

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
POSICIÓN AUTOSINTONIZABLE PARA UN CILINDRO NEUMÁTICO DE
DOBLE EFECTO**

OSCAR JULIAN SABOGAL FORERO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN
PEREIRA
2016**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
POSICIÓN AUTOSINTONIZABLE PARA UN CILINDRO NEUMÁTICO DE
DOBLE EFECTO**

OSCAR JULIAN SABOGAL FORERO

**Trabajo presentado como requisito para la optar al título de:
Magister en Sistemas Automáticos de Producción**

Director:

**SIGILFREDO ARREGOCES CAMPO
FIE-UTP, Ingeniero Electricista, M. Sc.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN
PEREIRA
2016**

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A mi Padre por ser ejemplo de vida, a mi hermana por ser una eterna compañera, a mi madre siempre presente, a mi novia por su compañía y apoyo, y especialmente a Antonia, impulso final para terminar este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme terminar este proyecto que es un paso importante para el desarrollo personal y profesional.

Agradezco igualmente a mi director, Ingeniero M.Sc Sigilfredo Arregoces Campos, por la oportunidad de desarrollar este proyecto y por permitirme el uso de las instalaciones del laboratorio de control de la Escuela de Tecnología Eléctrica de la UTP.

A los monitores del laboratorio de control de la escuela de Tecnología Eléctrica que de una u otra forma colaboraron en el desarrollo del proyecto.

A todas las personas que de alguna forma me ayudaron para culminar con éxito este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN	10
1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2 JUSTIFICACION	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo general.....	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 CONCEPTOS BÁSICOS.....	13
1.4.1 Diseño de un sistema de control.....	13
1.4.2 Modelo matemático.....	14
1.4.2.1 Identificación de parámetros.....	16
1.4.2.1.1 Métodos determinísticos clásicos.....	19
1.4.2.1.2 Métodos estadísticos.....	20
1.4.2.1.3 Métodos de caja negra.....	21
1.4.3 Controladores	21
1.4.3.1 Controlador lógico programable.....	25
1.4.3.2 Control autosintonizable	27
1.5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	28
1.5.1 Cilindro neumático	29
1.5.1.1 Unidad guía para cilindros normalizados.....	30
1.5.2 Válvula distribuidora proporcional	30
1.5.3 Sistema de medición de recorrido.....	32
1.5.4 Unidad de mantenimiento	33
1.5.5 Sistema de abastecimiento de aire	34
1.5.6 Montaje	35
1.5.6.1 Montaje físico.....	35
1.5.6.2 Circuito neumático	35
1.5.6.3 Diagrama de control	37

2.	MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA	38
2.1	MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS FÍSICOS.....	38
2.1.1	Modelo del cilindro neumático.....	38
2.1.2	Modelo de la válvula proporcional.....	42
2.1.3	Modelo de la válvula conectada al cilindro.....	46
2.1.4	Modelo Del Sensor De Posición Lineal.....	52
2.2	IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL NO PARAMÉTRICA DEL SISTEMA.	54
2.2.1	Identificación de la válvula proporcional	54
2.2.2	Identificación del sensor de posición lineal	57
2.2.3	Identificación del sistema en lazo abierto.....	59
2.2.3.1	Descripción del proceso	60
2.2.3.2	Análisis de los datos	61
3	DISEÑO DEL CONTROLADOR	74
3.1	TÉCNICAS DE DISEÑO DE CONTROLADORES	74
3.1.1	Técnica del lugar geométrico de las raíces.....	75
3.1.2	Técnicas de diseño en frecuencia.....	75
3.2	SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	76
3.2.1	Método de Ziegler y Nichols.....	77
3.2.1.2	Método de lazo cerrado	79
3.2.1.3	Método de Tyreus-Luyben.....	80
3.2.1.4	Método CHR	80
3.2.1.5	Sintonización de controladores usando MATLAB.....	81
3.3	DISEÑO DEL CONTROLADOR DE POSICIÓN	82
3.3.1	Definición de los requerimientos del sistema	82
3.3.2	Ubicación del controlador con respecto a la planta.....	84
3.3.3	Selección de la acción de control.....	84
3.3.4	Sintonización del controlador	85
3.3.4.1	Método de Ziegler-Nichols de lazo cerrado	86
3.3.4.2	Optimización de los parámetros del controlador usando Matlab	90
4	IMPLEMENTACIÓN Y SINTONIZACIÓN FINAL DEL SISTEMA	93
4.1	USO DEL BLOQUE PID COMPACT EN TIA PORTAL	93
4.1.1	Configuración inicial del bloque	96
4.2	ESTRUCTURA DE CONTROL	97

4.3	AUTOSINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR	100
4.4	SISTEMA SCADA	104
5	CONCLUSIONES	106
6	RECOMENDACIONES.....	108
7	BIBLIOGRAFÍA.....	109
	ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Proceso de diseño de sistemas de control	14
Figura 2. Proceso de identificación de parámetros.....	18
Figura 3. Configuración de un sistema de control en serie.....	22
Figura 4. Clasificación de Controladores.....	23
Figura 5. Respuesta de las acciones de control ante una entrada de error escalón unitario	26
Figura 6. Estructura básica de un PLC.....	27
Figura 7. Modelo de un controlador autosintonizable	28
Figura 8. Cilindro neumático de doble efecto	29
Figura 9. Unidad guía para cilindro.....	30
Figura 10. Válvula distribuidora proporcional.....	31
Figura 11. Relación entre caudal y corriente de la válvula proporcional.....	31
Figura 12. Sistema de medición de recorrido	32
Figura 13. Unidad de mantenimiento.....	33
Figura 14. Sistema de abastecimiento de aire.....	34
Figura 15. Montaje final del sistema	36
Figura 16. Base y sistema de conexión cilindro-potenciometro.....	36
Figura 17. Circuito neumático del sistema.....	37
Figura 18. Diagrama de bloques de control del sistema.....	37
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre del cilindro	38
Figura 20. Análisis del fluido en el cilindro.....	40
Figura 21. Análisis de caudales en la válvula	42
Figura 22. Circuito del potenciómetro.....	52
Figura 23. Comportamiento de la válvula	56
Figura 24. Proceso de identificación del sensor de posición	57
Figura 25. Respuesta del sensor de posición.....	59
Figura 26. Identificación del sistema en lazo abierto	60
Figura 27. Proceso de adquisición de datos.....	61
Figura 28. Comportamiento del cilindro ante una entrada de 10,5 mA.....	62
Figura 29. Comportamiento del cilindro ante una entrada de 12,5 mA.....	62
Figura 30. Relación entre velocidad del cilindro y corriente en la válvula.....	66
Figura 31. Comportamiento del sistema ante una rampa escalonada.....	67
Figura 32. Modelo obtenido utilizando el "Toolbox: Ident" de Matlab	69
Figura 33. Comparación sistema real y simulado.....	69
Figura 34. Intervalos de confianza para 99%	71
Figura 35. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.....	72
Figura 36. Diagrama de bloques usado para simular el comportamiento.....	73
Figura 37. Respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario	73
Figura 38. Método de sintonización de lazo cerrado	77
Figura 39. Método de sintonización en lazo abierto	77
Figura 40. Curva de comportamiento tipo S	78

Figura 41. Oscilaciones sostenidas	79
Figura 42. Configuración de arquitectura de control usando SISOTOOL	82
Figura 43. Controlador PI	85
Figura 44. Comportamiento de la planta ante una entrada escalón unitario	86
Figura 45. Sistema de lazo cerrado utilizando un controlador proporcional	87
Figura 46. Arreglo de Routh-Hurwitz para analizar estabilidad.....	87
Figura 47. Comportamiento del sistema controlado obtenido en la simulación	90
Figura 48. Diagrama de bloques usando el controlador PID	90
Figura 49. Configuración inicial del bloque en Simulink	91
Figura 50. Sintonización del controlador	91
Figura 51. Comparación de la respuesta del sistema.....	92
Figura 52. Bloque PID_Compact	94
Figura 53. Lazo de regulación	94
Figura 54. Algoritmo PID	95
Figura 55. Ajustes iniciales del bloque PID 1.....	96
Figura 56. Configuración inicial bloque PID 2.....	97
Figura 57. Configuración inicial bloque PID 3.....	98
Figura 58. Configuración del regulador PID-compact.....	98
Figura 59. Normalizado y escalado de la posición	99
Figura 60. Adecuación de la corriente de salida.....	99
Figura 61. Normalizado y escalado de la consigna	100
Figura 62. Normalizado y escalado de la corriente para visualización	100
Figura 63. Configuración de la consigna usando entradas analógicas.....	101
Figura 64. Ventana de puesta en servicio bloque PID_compact	102
Figura 65. Sintonización fina del regulador	103
Figura 66. Parámetros sintonizados del regulador	103
Figura 67. Comportamiento del sistema ante distintas consignas.....	104
Figura 68. Sistema SCADA del sistema	105

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Comparación de métodos de obtención de modelos matemáticos	17
Tabla 2. Selección de la acción de control.....	24
Tabla 3. Relación de las constantes del controlador con la respuesta del sistema	25
Tabla 4. Identificación de los parámetros del sistema	54
Tabla 5. Datos adquiridos de comportamiento de la válvula.....	55
Tabla 6. Proceso de identificación del sensor de posición.....	57
Tabla 7. Modelo identificado con entradas constantes	64
Tabla 8. Datos de velocidad del cilindro ante distintas corrientes.....	65
Tabla 9. Comparación de datos reales y simulados	70
Tabla 10. Resultados prueba F de Fisher	71
Tabla 11. Sintonización de parámetros método de Ziegler-Nichols en lazo abierto	78
Tabla 12. Sintonización de parámetros método de Ziegler-Nichols de lazo cerrado	79
Tabla 13. Sintonización de parámetros método de Tyreus-Luyben	80
Tabla 14. Sintonización de parámetros método CHR 1	80
Tabla 15. Sintonización de parámetros método CHR 2	81

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1 Adquisición de datos e identificación de sistemas usando Matlab y calibración de la tarjeta de adquisición de datos	112
Anexo 2 Tablas de la identificación del sistema	124
Anexo 3 Catálogo de instrumentos utilizados.....	130
Anexo 4. Cálculo de parámetros del controlador con el modelo de segundo orden	141
Anexo 5. Códigos de Matlab utilizados.....	143

RESUMEN

Este trabajo parte de la necesidad de generar aplicaciones en el área de control que permitan un mayor desarrollo a nivel académico y productivo, la generación de soluciones es tal vez la más importante razón de ser de la ingeniería y en un postgrado aún más, ya que los conocimientos se profundizan y las bases conceptuales se hacen más fuertes.

Buscando estas soluciones se llega al conocimiento de la neumática como una rama importante dentro del área de la automatización y del control que permite manejar procesos con buenos niveles de precisión y fuerza. Pero se advierten algunas falencias como son la falta de controles más robustos y el poco uso a nivel de la Universidad Tecnológica de Pereira de la neumática proporcional, por estas razones se llega entonces a la idea inicial del proyecto para diseñar el sistema de control de un cilindro de doble efecto que sea autosintonizable, lo cual se realizó utilizando las herramientas tecnológicas que se tenían a mano y que dieran lugar a un desarrollo asentado en la realidad.

Inicialmente se buscaron fuentes de conocimiento sobre los principios básicos del control clásico y adaptativo, así como de la neumática proporcional y el uso de los autómatas programables. Estos tres componentes se constituyen en las bases del proyecto. Para el desarrollo del proyecto se utilizaron los elementos con que se contaban en el laboratorio de control de la Escuela de Tecnología Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

En la segunda etapa del proyecto se buscó el modelo matemático de los componentes del sistema, como son válvula, cilindro y sensor, e igualmente se desarrolló una identificación de los parámetros de funcionamiento del sistema de tal forma que se pudiera tener el punto inicial para el diseño del sistema de control.

Posteriormente con el modelo obtenido, comienza el proceso de diseño controlador que permita modificar el comportamiento del sistema para obtener el comportamiento deseado, en esta etapa del proceso se utilizan métodos experimentales para obtener una sintonización del controlador y también se definen todos los requerimientos de diseño.

La última etapa del desarrollo del proyecto tiene que ver con la implementación física del mismo para lo cual se utiliza un autómata programable SIEMENS S7-1200, en este punto del desarrollo se genera la estructura de control y el sistema SCADA que permita una monitorización del sistema.

Finalmente se evaluó el sistema con lo cual se logró obtener una respuesta satisfactoria del sistema que se diseñó, concluyendo así el proyecto con un sistema controlado que permite obtener la posición deseada del cilindro utilizado y la posibilidad de autosintonizarse el controlador por medio de las herramientas tecnológicas brindadas por el autómata programable.

INTRODUCCIÓN

“El diseño establece y define soluciones con estructuras pertinentes para problemas no resueltos, o define nuevas soluciones a problemas que han sido resueltos de una forma diferente” (Dieter, 2011)^[8]. El presente proyecto de grado presenta el diseño de un sistema de control de posición de un cilindro neumático de doble efecto, el cual tenga la posibilidad de ser autosintonizable, de tal forma que los cambios en los parámetros del sistema no afecten su funcionamiento. El proyecto se realizó buscando generar opciones más robustas en cuanto al control y pretende ser punto de partida para investigaciones posteriores donde se involucre este tipo de sistemas dentro de procesos productivos automatizados que puedan impactar distintos sectores sociales.

En el proyecto se utilizaron los conocimientos adquiridos en el transcurso de la maestría, en especial los relacionados con control y neumática, para desarrollar una aplicación de los mismos. Para tal fin fue necesario realizar una revisión bibliográfica inicial donde se pudieron aclarar conceptos importantes para el desarrollo del mismo, donde se tuvieron en cuenta proyectos desarrollados en el área dentro y fuera de la Universidad Tecnológica de Pereira, como los adelantados por Bacca, Burbano y Hoyos (2003)^[5] o el adelantado por Fuentes (2009)^[17]. Igualmente se tomaron en cuenta las posibilidades tecnológicas con que se contaban en la Universidad y que fueran utilizadas también en los sectores productivos como son los autómatas programables.

El proyecto se puede descomponer en cuatro fases importantes a saber: recolección y organización de la información, modelado e identificación del sistema a controlar, diseño del sistema de control e implementación del mismo. Estas fases se describen detalladamente en cada uno de los capítulos del documento. Como punto final del proyecto se logró la implementación del controlador diseñado y la evaluación de su comportamiento bajo condiciones de trabajo.

1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aparición de nuevas tecnologías y la necesidad de procesos cada vez más precisos requieren de la apropiación de las primeras con el fin de ser utilizada en los nuevos procesos, dentro del área de control de procesos, la neumática por su bajo costo, su mínimo mantenimiento y su capacidad de realizar trabajos que requieren la aplicación de fuerzas de magnitudes considerables con un menor costo que otro tipo de tecnología; es una de las tecnologías más utilizadas, pero a pesar de su uso generalizado se requieren desarrollar métodos de control que provean mayor precisión debido a estos nuevos avances de la tecnología y la necesidad de desarrollar nuevas aplicaciones.

Se hace necesario entonces desarrollar estos nuevos sistemas de control más precisos y robustos que permitan la aplicación de la neumática en nuevas tecnologías haciendo uso de las nuevas herramientas con que se pueden contar.

Con este propósito, en este proyecto se identificaron los parámetros de funcionamiento de un cilindro neumático y a partir del modelo obtenido se desarrolló un sistema de control que permitió posicionar el mismo en cualquier punto de su carrera de forma tal que se obtuvo una respuesta rápida y precisa. Además luego de obtener el sistema de control se validó el mismo usando el autómatas S7-1200. Para finalizar se usó la herramienta de programación de objeto tecnológico del autómatas para convertir el sistema de control en un sistema autosintonizable.

1.2 JUSTIFICACION

La utilización de cilindros neumáticos en la industria como medio de transformación de la energía de un circuito de aire comprimido en trabajo mecánico es tal vez una de las prácticas más extendida en el área de control de procesos, y en un mundo que exige cada vez mayor precisión y velocidad en los procesos, el desarrollo de sistemas que permitan una mejor utilización de estos componentes tan utilizados es una necesidad.

En este sentido se hace necesario entonces, realizar un estudio del comportamiento del cilindro con el fin de obtener los modelos matemáticos que lo rigen tomando en cuenta todas las características experimentales de su funcionamiento, para poder desarrollar un sistema de control de la posición del mismo, que permitirá en el ámbito práctico utilizar el cilindro como elemento final de control de una manera precisa y eficiente. Aunque el proyecto se desarrolle para un solo cilindro la metodología servirá para el desarrollo de sistemas de control para otros cilindros.

Este proyecto entonces permite tanto al sector académico como al sector productivo contar con un sistema de control específico para un cilindro normalizado y con una metodología para el desarrollo de controles de posición para cilindros normalizados que permitirán a su vez desarrollar aplicaciones neumáticas en distintas áreas en las que se requiera su uso.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar, construir y aplicar un sistema de control autosintonizable para un cilindro neumático de doble efecto y validarlo haciendo uso del controlador programable S7-1200.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los parámetros de funcionamiento del cilindro neumático experimentalmente.
- Seleccionar la instrumentación necesaria para realizar las pruebas y construir los circuitos neumáticos para la realización de las mismas
- Diseñar el sistema de control de posición para el cilindro neumático de doble efecto.
- Implementar el sistema de control de posición en el cilindro neumático

- Evaluar el comportamiento del sistema de control y realizar las modificaciones necesarias.
- Validar el sistema de control diseñado usando el controlador programable S7-1200.
- Usar las herramientas de programación de objeto tecnológico del autómatas S7-1200 para convertir el sistema en un sistema autosintonizable.

1.4 CONCEPTOS BÁSICOS

1.4.1 Diseño de un sistema de control

Siendo este el principal objetivo de este proyecto es importante revisar las etapas a tener en cuenta en el diseño un sistema de control. Aunque cada sistema físico requiere de un estudio especial, el desarrollo de un sistema de control tiene etapas coincidentes sin importar la naturaleza del sistema que se quiere controlar.

El primer paso conducente al desarrollo de la estrategia de control es el estudio del proceso o sistema que se desea controlar, así como del comportamiento que se requiere del mismo, el conocimiento de estos dos elementos dan la claridad necesaria para comenzar el proceso de diseño de un sistema de control.

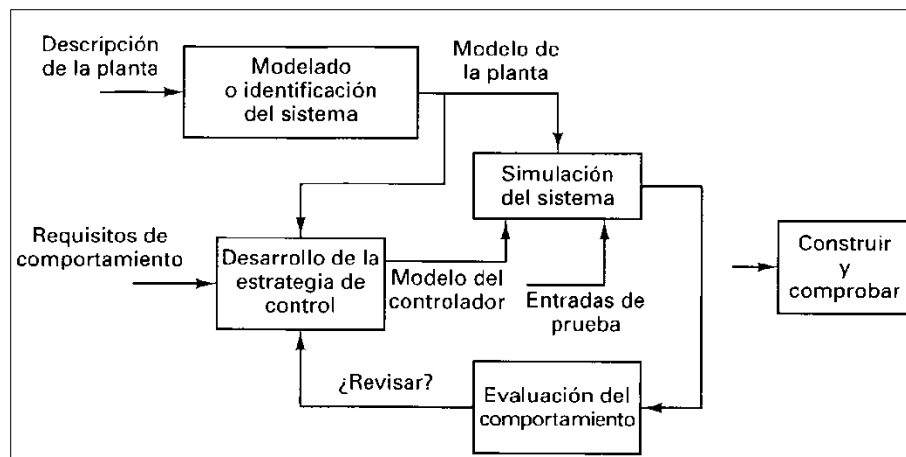
El estudio del comportamiento del sistema a controlar debe llevar a un modelo matemático del fenómeno físico que lo rige. Esta obtención del modelo matemático puede darse de dos formas básicas:

- **Modelado:** en el cuál se trata de determinar una serie de ecuaciones que describen el sistema físico a controlar cuya obtención se hace aplicando las leyes físicas que rigen el proceso.
- **Identificación:** La segunda forma de obtener el modelo matemático requerido para implementar la acción de control es la Identificación, en donde por medio de análisis experimentales se encuentra la relación existente entre las entradas y las salidas del sistema.

Conociendo el modelo del sistema que se va controlar y el comportamiento deseado del mismo, se entra al proceso de diseño del controlador, en el cual hay que tomar en cuenta las necesidades del proceso, es decir, se debe hacer una selección y un diseño del tipo de controlador partiendo de variables como: velocidad de respuesta, respuesta a perturbaciones, robustez, etc.

La siguiente etapa dentro del proceso de diseño consiste en la simulación por software y evaluación del comportamiento del sistema compuesto por la planta y el controlador revisando que cumpla con los requerimientos de control y en caso de no hacerlo se procede a realizar un rediseño del controlador, en caso de que en esta etapa se observe un comportamiento satisfactorio se procede entonces a la construcción e implementación del sistema de control. En la figura 1 se presenta el proceso de diseño de un controlador.

Figura 1. Proceso de diseño de sistemas de control



Fuente: LEWIS, Paul H, YANG, Chang. (2011) [20]

1.4.2 Modelo matemático

Un modelo se establece con el fin de describir ampliamente el comportamiento de un sistema físico, expresando las relaciones entre las variables y los elementos, dando lugar a posibles predicciones del funcionamiento del mismo (Arahal, M Berenguel S, M, Rodriguez D, F, 2006)^[1], partiendo siempre de la aplicación de leyes básicas de la física.

Los modelos representan una idealización y una simplificación de la realidad. Se ignora como consecuencia algunos detalles del proceso natural y enfatiza en sus manifestaciones esenciales.

Una de las características que debe tener un modelo es una buena relación entre simplicidad y exactitud, es decir, no debe ser un modelo que reduzca tanto la complejidad del sistema que lo lleve a omitir parámetros importantes. Generalmente un modelo más complejo es más exacto pero tampoco se debe exagerar en la complejidad del mismo porque puede convertirse en un modelo inentendible. Se busca entonces un modelo que cumpla con el principio de parsimonia, que dice, “siendo iguales otras cosas, los modelos simples son preferibles a los complicados”

Otra característica de los modelos es su verificabilidad, es decir que al comparar el comportamiento dado por el análisis matemático y la simulación del sistema debe arrojar resultados similares a los que en la realidad se obtienen, pudiendo dar una cualificación de la exactitud del modelo.

Para la obtención del modelo de un sistema físico, como se dijo anteriormente se tienen dos formas de hacerlo:

La primera de ellas es por medio de la aplicación de los principios físicos que lo rigen, este tipo de modelado requiere entonces:

- Conocimiento preciso del sistema que se va modelar
- Conocimiento de las leyes físicas que gobiernan el sistema.
- Realización del modelo conceptual en el cual se deben asumir hipótesis tratando de cumplir la relación entre simplicidad y exactitud.
- Subdivisión del sistema en subsistemas interconectados
- Conocimiento matemático para la formulación del modelo en ecuaciones diferenciales
- Determinación de los parámetros del modelo y sus condiciones iniciales.

La segunda forma de encontrar el modelo es por medio de identificación de parámetros o modelos de caja negra, en este caso los modelos se obtienen mediante la experimentación y observación del comportamiento del sistema a modelar. Este tipo de modelado puede ser una aproximación más simple a los sistemas, debido a que no es necesario un conocimiento tan preciso de los fenómenos que se presenten, solo se busca la relación entre las entradas y las salidas del sistema que sean importantes para el modelo, sin profundizar en cada una de las relaciones que se presenten en los elementos que componen el sistema.

Dentro de los inconvenientes que puede presentar este tipo de modelo es que si se presentan distintos datos de entrada y de salida a pesar de ser un mismo sistema se pueden encontrar modelos distintos, lo cual es solucionable realizando una buena aproximación estadística de los datos que se obtienen experimentalmente buscando el mayor rango posible de datos para que se obtenga un modelo más exacto y en el cual se involucren todas las características del sistema. Con este tipo de modelo no se busca una explicación total del sistema sino un modelo con los elementos necesarios para poder continuar con el proceso de diseño del controlador, es decir, es un método más práctico que permite entender cómo se relacionan las variables controladas y las entradas del sistema.

En la tabla 1 se presenta un comparativo entre los dos tipos de obtención de modelos.

1.4.2.1 Identificación de parámetros

Cuando se habla de identificación de parámetros, se hace referencia a métodos que permiten desarrollar o mejorar la representación matemática de un sistema físico mediante el uso de datos obtenidos experimentalmente, es decir, es la forma de relacionar la realidad con los modelos que la representan, logrando de esta manera un mejor entendimiento de la misma y perfeccionamiento de su representación.

El proceso de identificación puede ser asumido desde dos perspectivas:

- **Conociendo el modelo parametrizado del sistema:** en esta perspectiva, se tiene un modelo del sistema basado en los principios físicos que lo

gobiernan, pero sin conocer totalmente los parámetros que en él se involucran.

Tabla 1. Comparación de métodos de obtención de modelos matemáticos

	Métodos derivados de leyes	Modelos de caja negra
Fuentes de información	Primeros principios	Experimentos y datos
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Buenas características de extrapolación • Interpretables • Alta fiabilidad • Escalables 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo tiempo de desarrollo • No se requiere mucho conocimiento del dominio de aplicación • Se puede usar junto a otros • Se puede usar en procesos cuyo funcionamiento no sea muy conocido
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere conocimiento de las áreas específicas • El conocimiento que se tenga limita la precisión • Consumen mucho tiempo de desarrollo • Sólo puede obtenerse para procesos bien conocidos 	<ul style="list-style-type: none"> • La extrapolación no es fiable • No son escalables • Los datos limitan la precisión • Generalmente no son interpretables
Campos de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación y diseño • Construcción 	<ul style="list-style-type: none"> • Procesos ya existentes

Fuente: ARAHAL, Manuel, BERENGUEL S, Manuel, RODRIGUEZ D, Francisco (2006) ^[1]

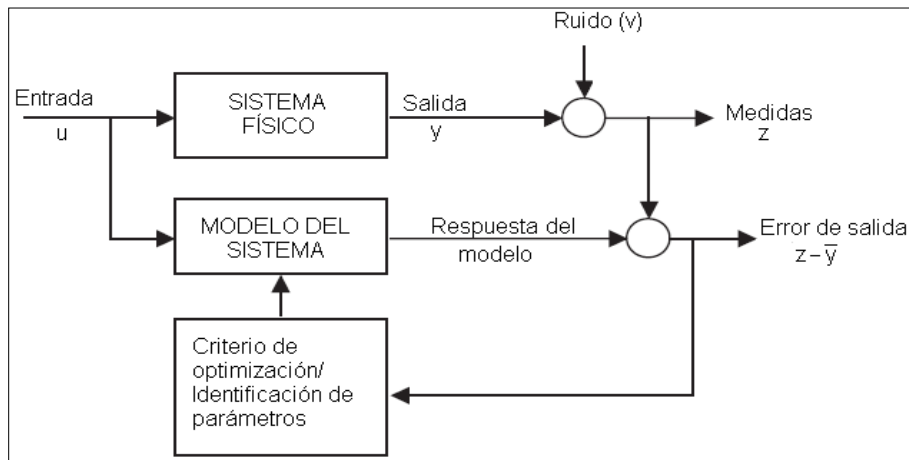
Para conocer los parámetros del sistema desde esta perspectiva se debe realizar un procedimiento iterativo hasta que el error de salida se minimice de acuerdo al criterio empleado, por lo tanto, las medidas experimentales y las salidas del modelo son muy cercanas.

En este caso existen dos formas básicas en que se puede realizar el proceso de identificación de parámetros, en un primer método, se identifican los parámetros determinando a partir de las respuestas del sistema causadas por entradas que varían en el tiempo, los valores propios de los modelos, en un segundo método, se buscan las entradas que permiten que el sistema se comporte dando una respuesta preestablecida.

En resumen, se asume que la medida está afectada por ruido y errores en la misma, entonces se utilizan los métodos de identificación para encontrar los parámetros que mejor describen el comportamiento del sistema

La figura 2 presenta en resumen la forma de realizar el proceso de identificación

Figura 2. Proceso de identificación de parámetros



Fuente: RAOL, J.R; GIRIJA, G; SINGH J. (2004) [25]

- **Desconociendo el modelo físico del sistema:** desde esta perspectiva, solo se encuentra la relación entre la entrada y la salida del sistema experimentalmente, conocida como modelado de “caja negra”.

Para encontrar los parámetros del sistema físico, se hace necesario también la realización de procesos iterativos que conlleven a un modelo matemático cercano a la realidad.

A continuación se explican algunos de los métodos usados en la identificación de parámetros (Van den Bos, A, 2007)^[31]. Las herramientas utilizadas para la identificación, así como el software y su estructura se pueden observar en el anexo 1.

1.4.2.1.1 Métodos determinísticos clásicos

A los métodos clásicos se les conoce como determinísticos por el hecho de que no se hace ningún supuesto estadístico con respecto a las observaciones realizadas, dentro de estos métodos existen el método de Prony y el de “Peeling” exponencial, los cuales tienen tres características:

- No existen errores en el modelo matemático de las observaciones, al no tener en cuenta los modelos matemático-estadísticos de los errores y su tratamiento.
- Se da el énfasis en la simplicidad computacional y conceptual. Generalmente son “trucos” que permiten evadir cálculos demasiado complejos, ya que el desarrollo de estos métodos fue realizado cuando no existían tantas herramientas computacionales. Dando esto como resultado una baja precisión y exactitud.
- Son estos modelos específicos que se pueden usar en casos puntuales.

Estos métodos poseen también varias dificultades como son:

- Sin errores en las observaciones, los errores en los parámetros estimados no pueden ser explicados.
- Son generalmente métodos subjetivos y usan técnicas gráficas, dando lugar a que diferentes personas realizando la misma observación en el mismo experimento se obtengan resultados distintos.

- El experimentador no puede aprovechar el conocimiento “a priori” sobre el error en la observación para mejorar la precisión y exactitud de la identificación de los parámetros.
- Como los métodos son funciones específicas, para cada modelo se debe desarrollar un método particular.

1.4.2.1.2 Métodos estadísticos

Buscando una mejora de la precisión y exactitud de los parámetros identificados, se desarrollaron métodos que reducen el error por medio de manejos estadísticos de la información, lo cual lleva a que en la experimentación, se puedan tener mejores y más acertadas conclusiones acerca de la magnitud de los parámetros. Estos métodos, deben estar complementados con una buena práctica en la toma de medidas. Sin embargo a pesar de realizar mediciones con todo el cuidado posible, en las mismas se pueden presentar fluctuaciones, dando lugar a que las medidas cambien cuando se repite un experimento.

El uso de la estadística hace que las medidas sean tomadas como variables estocásticas, por esta razón cuando un experimentador dice que el comportamiento de un parámetro es sinusoidal, lo que quiere decir es que teóricamente sus medidas en cada punto están descritas por una función sinusoidal. Generalmente, se cree que la medida enésima w_n es igual al valor de la función paramétrica conocida $g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$, en el punto x_n también conocido, es decir:

$$Ew_n = g(x_n; \boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

Donde “E”, representa la expectativa matemática y $\boldsymbol{\theta}$ el vector de parámetros exactos.

$$\boldsymbol{\theta} = (\theta_1 \dots \dots \theta_k) \quad (2)$$

El uso de estos métodos permite ciertas ventajas como son:

- Posibilidad de calcular precisión y exactitud, ya que mediante el uso de estos métodos se pueden calcular tanto el error sistemático como el error no sistemático.
- Posibilidad de encontrar métodos de identificación precisos
- Capacidad de calcular por adelantado la precisión de las mediciones
- Capacidad de seleccionar las variables experimentales a ser tenidas en cuenta con el fin de mejorar la precisión de las pruebas realizadas

1.4.2.1.3 Métodos de caja negra

Cuando se trata de identificar parámetros sin apoyarse en el modelo físico del sistema, se utilizan métodos conocidos como de “caja negra”, los cuales definen el modelo a partir del comportamiento dinámico del sistema, es decir en los registros de las excitaciones del sistema y sus respuestas, dejando a un lado la formulación matemática del sistema.

Este tipo de métodos no permite conocer la dinámica interna del sistema, solo permite encontrar la relación que existe entre las entradas y las salidas del sistema. Esta aproximación por el método de “caja negra” también debe ser sometida a evaluación estadística y afinamiento para encontrar un comportamiento verificable y exacto con relación al sistema real

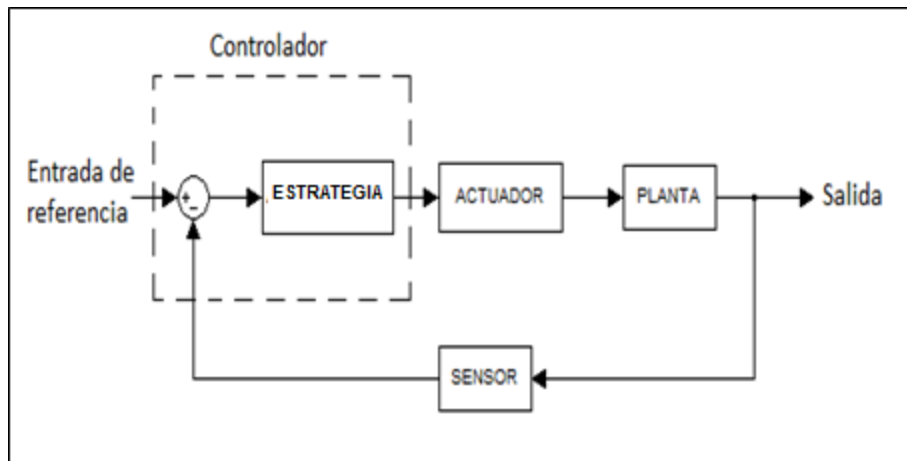
1.4.3 Controladores

En el diseño del sistema de control, luego de reconocer y modelar el sistema y conocer las características de comportamiento deseadas, se debe continuar con el diseño del controlador. El controlador dentro de un sistema de control es el elemento encargado de detectar y corregir los errores que se producen por medio de la comparación del valor de referencia con el valor medido de la variable que se desea controlar, es decir, el controlador analiza la salida del sistema y decide que acción de control tomar para cumplir con los criterios de funcionamiento.

Dentro de los criterios que se utilizan en el diseño y selección de controladores, se encuentran la estabilidad relativa, error en estado estable, respuesta transitoria, respuesta en frecuencia y sensibilidad a la variación de los parámetros.

En la teoría clásica de control, la configuración del controlador es en serie, es decir el controlador se ubica en serie con la planta y el actuador, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Configuración de un sistema de control en serie

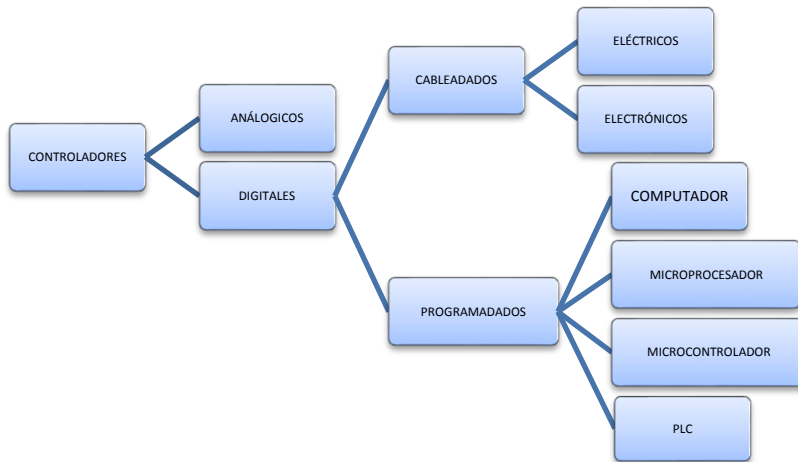


Fuente: Adaptación de varios autores ^{[18][20][22]}

Los controladores pueden ser de distintos tipos y se pueden clasificar de acuerdo a su forma de implementación física, como se muestra en la figura 4, la primera subdivisión (analógicos ó digitales) depende de la forma de recibir y manejar las señales, la subdivisión de los controladores digitales (cableados ó programados) se refiere a la capacidad de flexibilidad del sistema, es decir, en los primeros el control es fijo y no se puede modificar sin cambiar todo el sistema de cableado mientras que en el segundo las distintas acciones de control pueden ser programadas y reprogramadas dependiendo de las necesidades. Es de anotar que en el desarrollo de este proyecto se utilizarán controladores lógicos programables.

Además de la anterior clasificación también es necesario conocer las distintas acciones de control que se pueden dar en un proceso (Kuo, B, 1995) ^[18], ellas son:

Figura 4. Clasificación de Controladores



- On/Off: En este sistema el elemento final de control posee únicamente dos posiciones, por lo tanto el controlador envía solamente dos posibles señales de control permitiendo o no el paso de la variable de entrada.
- Proporcional (P): En este tipo de respuesta la salida del controlador es proporcional a la señal de error, mientras que en el sistema anterior la respuesta del controlador varía para condiciones determinadas, en este sistema la amplitud de la señal de entrada al sistema afecta directamente la salida, en toda la gama de niveles de entrada. Un controlador proporcional se constituye entonces como un amplificador con una ganancia variable.
- Proporcional derivativo (PD): En este tipo de sistema se combina la acción proporcional con la acción derivativa, en la cual la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad con que cambia la señal de error, por lo tanto la velocidad de cambio de la señal de entrada es utilizada para determinar el factor de amplificación.
- Proporcional integral (PI): Este sistema es la combinación de la acción de un control proporcional con un control integral, donde la salida del controlador cambia con una velocidad proporcional a la señal de error, en este caso la señal se integra en vez de derivarse.

- Proporcional integral derivativo (PID): Este sistema combina los dos anteriores tipos.

La selección de la acción de control de acuerdo a lo expuesto por Creus ^[7], se puede hacer de acuerdo a la tabla 2.

En este punto es necesario aclarar que cada controlador tiene un modelo representado en una función de transferencia y que se pueden evaluar sus efectos analizando el controlador PID, que como se dijo anteriormente combina las distintas acciones de control, el modelo de este controlador, está dado de la forma mostrada en la ecuación 3.

Tabla 2. Selección de la acción de control

Control	Proceso		Cambios de carga	Aplicaciones
	Capacitancia	Resistencia		
Todo-nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad
Flotante	Media	Cualquiera	Cualquiera	Procesos con pequeños tiempos de retardo
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderados	Presión, temperatura y nivel donde offset no es inconveniente
Proporcional + integral	Cualquiera	Pequeña	Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal
Proporcional + derivada	Media	Pequeña	Cualquiera	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + integral + derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperaturas en intercambiador de calor)

Fuente: CREUS S, Antonio (1997) ^[7]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

En la tabla 3 se muestra el cambio en la respuesta del sistema en lazo cerrado cuando cada una de las constantes del controlador se incrementa.

Tabla 3. Relación de las constantes del controlador con la respuesta del sistema

Característica de respuesta	Tiempo de subida	Sobrepaso	Tiempo de establecimiento	Error en estado estacionario
Kp	Decrece	Incrementa	Pequeños cambios	Decrece
Ki	Decrece	Incrementa	Incrementa	Elimina
Kd	Pequeños cambios	Decrece	Decrece	Pequeños cambios

Fuente: ARREGOCES C, Sigilfredo (2015)^[2]

El controlador busca compensar el error que se presenta en el sistema, es decir reducir la diferencia entre la referencia y la salida mostradas en la figura 3, ante este error cada una de los controladores actúan de distinta manera como se muestra en la figura 5.

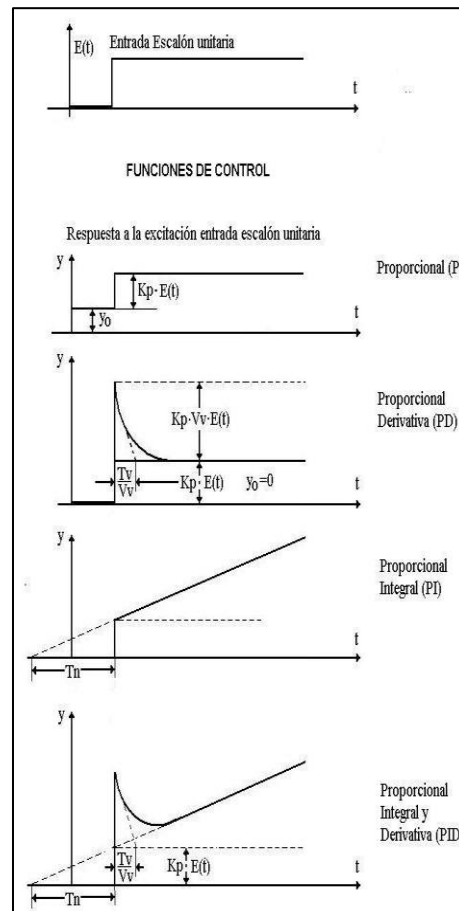
1.4.3.1 Controlador lógico programable

El controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo electrónico que cuenta con una memoria programable que permite almacenar instrucciones e implementar funciones específicas para optimizar el control de procesos industriales.

Como una primera aproximación a los PLC's se puede decir que está compuesto por una unidad central de proceso, una memoria programable, una interfaz de entrada y salida y un suministro de energía.

- La unidad central de proceso es la encargada de controlar y procesar las operaciones dentro del controlador, a su vez por medio del temporizador que contiene sincroniza y temporiza todos los elementos del sistema.
- La memoria tiene dos elementos, la memoria ROM, la cual guarda permanentemente los datos del sistema operativo y la memoria RAM en la que se almacenan los programas creados por el usuario.

Figura 5. Respuesta de las acciones de control ante una entrada de error escalón unitario



Fuente: ARREGOCES C, Silgifredo (2015)^[2]

- La fuente de energía permite mantener activos los programas creados por el usuario.
- La interfaz entrada/salida permite la comunicación con el usuario y con los demás elementos del sistema.

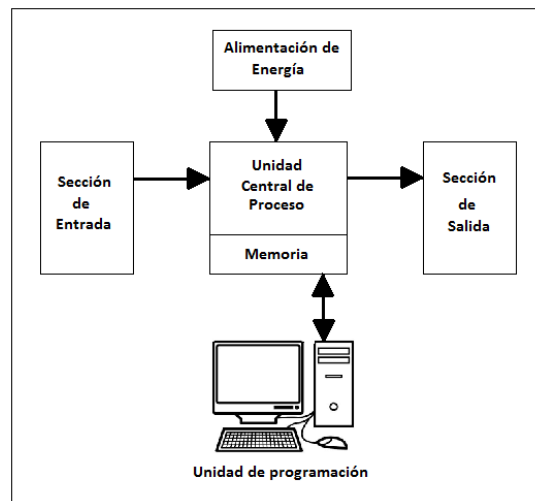
La conexión entre los componentes de un PLC se presenta en la figura 6.

Dentro de las características que poseen los controladores lógicos se encuentran (Parr, 2003)^[23]:

- Permite el control de procesos en planta

- Contiene funciones pre-programadas.
- Permite el acceso a la memoria de entradas y salidas
- Permite la verificación y diagnóstico de errores
- Empaquetado apropiado para ambientes industriales permitiendo resistir vibraciones, temperatura, humedad y ruido.
- La programación es fácil y su lenguaje de programación es básico.

Figura 6. Estructura básica de un PLC



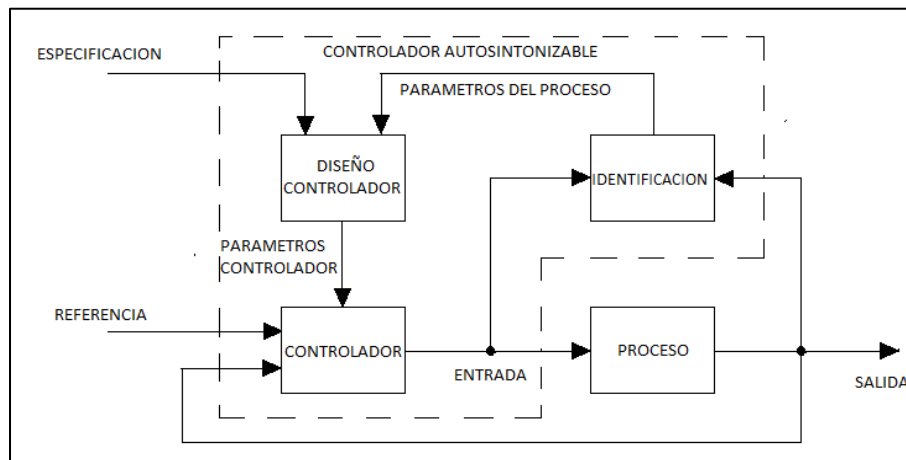
Fuente: PARR E.A (2003) ^[23]

1.4.3.2 Control autosintonizable

Como los sistemas son sujetos de variaciones en sus parámetros, debido a las perturbaciones que se presentan y al cambio propio de los parámetros del sistema, se desarrollaron técnicas de control adaptativas, como su nombre lo indica, estas técnicas de control se adaptan a estas variaciones de los parámetros proporcionando una mayor robustez al sistema.

Un control autosintonizable está en capacidad de identificar los parámetros del sistema y acorde a ellos modificar los parámetros del controlador, el modelo de un controlador autosintonizable se muestra en la figura 7.

Figura 7. Modelo de un controlador autosintonizable



Fuente: ASTROM, Karl Johan, WITTENMARK, Bjorn (2008) [3]

1.5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de control de posición construido está constituido por:

- Cilindro neumático de doble efecto
- Válvula distribuidora proporcional
- Sistema de medición de recorrido
- Unidad de mantenimiento
- Convertidor de señal

Además de los anteriores, hacen parte del conjunto en general:

- Sistema de abastecimiento de aire
- Autómata programable

1.5.1 Cilindro neumático

El cilindro al cual se le controlará la posición es un cilindro de doble efecto normalizado marca FESTO y con referencia DNC-50-320-PPV-A, el cual permite regular la amortiguación neumática en ambos lados. El actuador, es controlado mediante la válvula distribuidora proporcional que suministra la cantidad de aire necesaria para posicionar el cilindro y mantenerlo en el punto deseado. A su vez el cilindro para evitar el giro del vástago se encuentra conectado a una unidad guía. La figura 8 presenta el cilindro utilizado y su representación esquemática.

Figura 8. Cilindro neumático de doble efecto



Fuente: FESTO (2016)^[10]

Características principales de funcionamiento:

- Carrera: 320 mm
- Diámetro émbolo: 50 mm
- Amortiguación: Neumática regulable
- Presión de funcionamiento: 0,2 a 12 bar

1.5.1.1 Unidad guía para cilindros normalizados

Para evitar el giro del vástago y aumentar la precisión en la manipulación del cilindro, el vástago se encuentra conectado a una unidad guía de marca FESTO con referencia FENG- 50- 320-KF. La figura 9 presenta la guía para cilindros utilizada

Figura 9. Unidad guía para cilindro



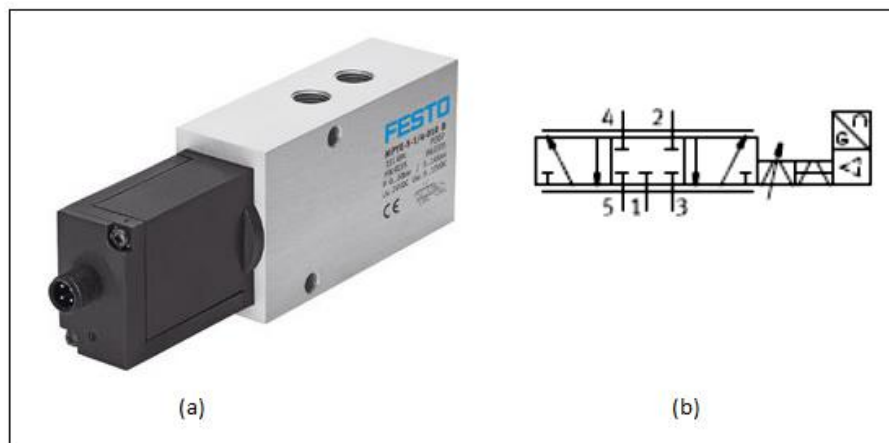
Fuente: FESTO (2016)^[12]

1.5.2 Válvula distribuidora proporcional

Como elemento final de control para el proyecto se utiliza una válvula distribuidora proporcional la cuál es accionada mediante una señal de corriente eléctrica en el rango de $4\text{mA} < i < 20\text{mA}$, la válvula utilizada es de marca FESTO y con referencia MPYE-5-1/4-420-B. En la figura 10 se presenta la válvula distribuidora utilizada y su representación esquemática.

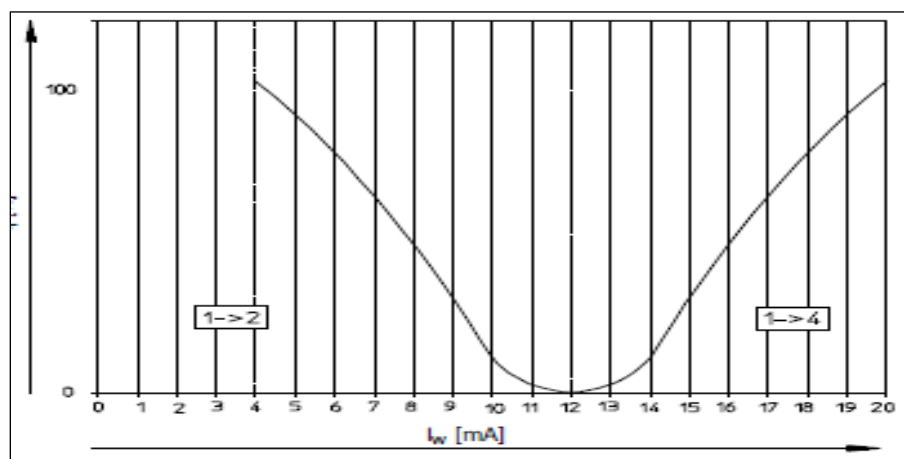
La válvula entrega un caudal proporcional entre los puertos como se muestra en la figura 11.

Figura 10. Válvula distribuidora proporcional



Fuente: FESTO (2016)^[11]

Figura 11. Relación entre caudal y corriente de la válvula proporcional



Fuente: FESTO (2013)^[15]

Características principales de funcionamiento:

- Entrada de señal analógica: Corriente de 4 a 20 mA
- Función de válvula: 5/3 vías, centro cerrado
- Diámetro nominal: 8 mm

- Caudal nominal: 1400 l/min
- Alimentación de tensión: 17 a 30 V DC
- Posición central de la válvula: 12(\pm 0.16)mA
- Histéresis máxima: 0.4%

1.5.3 Sistema de medición de recorrido

Para medir la posición del cilindro en cualquier punto de la carrera, se utiliza un potenciómetro lineal de marca FESTO cuya referencia es MLO-POT-360-LWG, el cual ante una entrada de posición entrega una salida de tensión en un rango de $0 < v < 10V$ en toda su carrera, la cual es de 360 mm. El sensor de posición utilizado se presenta en la figura 12

Figura 12. Sistema de medición de recorrido



Fuente: FESTO (2016)^[14]

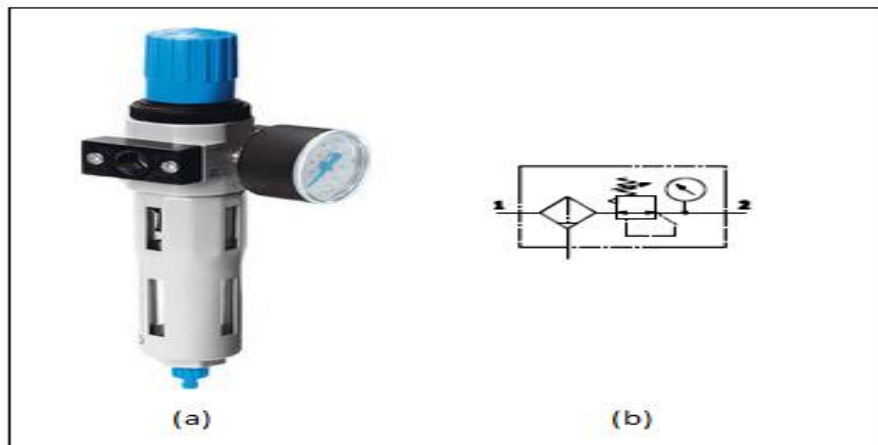
Características principales de funcionamiento:

- Resolución: 0.01 mm
- Velocidad máxima de avance: 5 m/s
- Aceleración máxima: 200 m/s²
- Alimentación de tensión(DC): 10 V

1.5.4 Unidad de mantenimiento

El aire comprimido debe permanecer a unas condiciones básicas de funcionamiento para evitar que las impurezas que se encuentran presentes en el mismo lleguen a los distintos elementos como válvula y cilindro produciendo desgaste, depósitos de humedad y mugre en las distintas partes del circuito neumático, causando mayores fallas en el sistema y aumentando el costo de mantenimiento del mismo, para tal fin, se utiliza la unidad de mantenimiento marca FESTO de referencia LFR-1/4-D-MINI, la cual consta de dos componentes, el filtro y el regulador. En la figura 13 se muestra la unidad de mantenimiento y su representación esquemática

Figura 13. Unidad de mantenimiento



Fuente: FESTO (2016)^[13]

El regulador tiene como función mantener la presión del circuito de trabajo a niveles constantes sin importar las variaciones que sufra la presión de suministro de la red de aire comprimido.

El filtro de las unidades de mantenimiento de aire comprimido se encarga de retirar las partículas sólidas y la humedad presentes en el aire, las partículas son retenidas en un filtro de material sinterizado y la humedad se retira del aire por la acción de la fuerza centrífuga hacia la parte inferior de la unidad de mantenimiento la cual debe ser vaciada cada vez que alcance su nivel máximo para evitar que pueda ser arrastrada de nuevo al sistema.

Condiciones principales de funcionamiento:

- Grado de filtración: 40 μm
- Margen regulación de la presión: 0.5 a 12 bar
- Cantidad máxima de condensado: 22 cm^3

1.5.5 Sistema de abastecimiento de aire

El suministro de aire comprimido para el proyecto se logra mediante el compresor de marca FIAC con referencia NEW SILVER D5,5/300. El sistema de abastecimiento de aire se presenta en la figura 14.

Figura 14. Sistema de abastecimiento de aire



Fuente: FIAC (2016)^[16]

Características principales de funcionamiento:

- Caudal: 450 l/min
- Voltaje: 220V
- Frecuencia: 60 Hz

- Presión máxima: 10 bar
- Potencia de entrada: 4.6 kW

1.5.6 Montaje

El montaje del sistema se realizó analizando desde tres puntos de vista de la interconexión de los elementos que lo componen, la primera de ellas mirando la forma física en que se unieron los elementos, la segunda de ellas mirando el circuito neumático y la última de ellas mirando el lazo de control.

1.5.6.1 Montaje físico

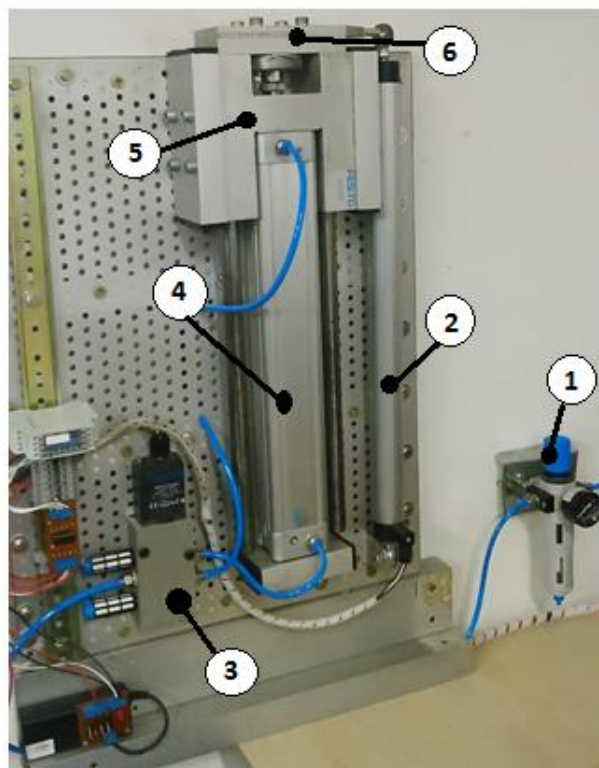
El montaje requirió de la construcción de la base para todo el sistema, así como los sistemas de fijación para los distintos elementos, todo el proceso constructivo se hizo usando aluminio, en la figura 15 se ve el montaje final del sistema.

En la figura 16 se muestran la base y el elemento de unión entre el cilindro y el sensor de posición lineal.

1.5.6.2 Circuito neumático

Las instalaciones neumáticas se hicieron de acuerdo a las recomendaciones de FESTO ^[9] y las conexiones se realizaron con manguera flexible de 6 mm. En la figura 17 se muestra el circuito neumático usado.

Figura 15. Montaje final del sistema



1. Unidad de mantenimiento; 2. Sensor de posición;
3. Válvula proporcional; 4. Cilindro; 5. Unidad guía;
6. Sistema de conexión cilindro-potenciometro

Figura 16. Base y sistema de conexión cilindro-potenciometro

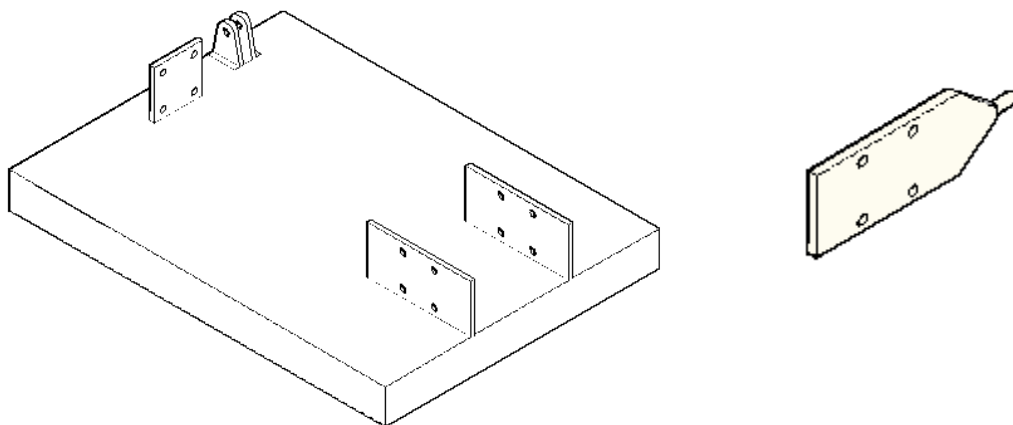
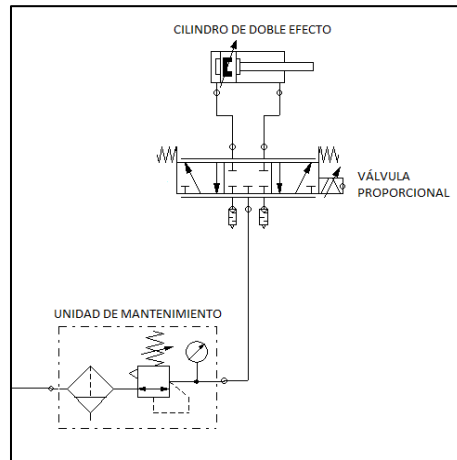


Figura 17. Circuito neumático del sistema

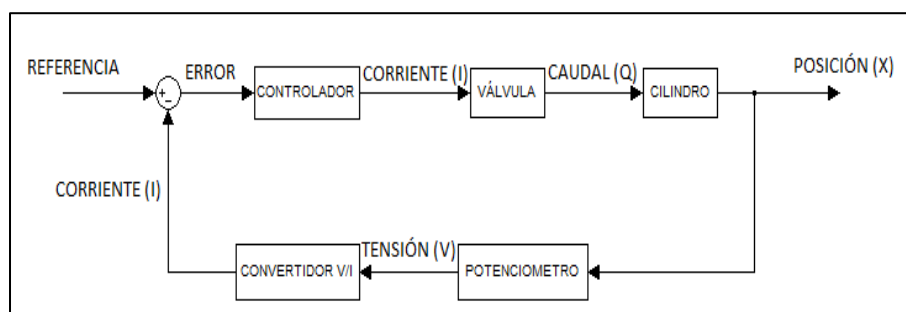


1.5.6.3 Diagrama de control

La disposición inicial supuesta de los elementos del sistema de control se hizo usando la disposición clásica en serie con el controlador en serie con la válvula que en este caso tiene la función de elemento final de control, es decir, va ser ella quien realice la acción sobre el cilindro para llevarlo a la posición de referencia, y el cilindro en este caso siendo la planta, también se ubica en serie con estos dos elementos.

Para cerrar el lazo de control, se debe realimentar la posición actual del cilindro, lo cual se realiza por medio del sensor de posición lineal y el convertidor de señal de tensión a voltaje. La figura 18 muestra el diagrama de bloques de control usado en este proyecto.

Figura 18. Diagrama de bloques de control del sistema



2. MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

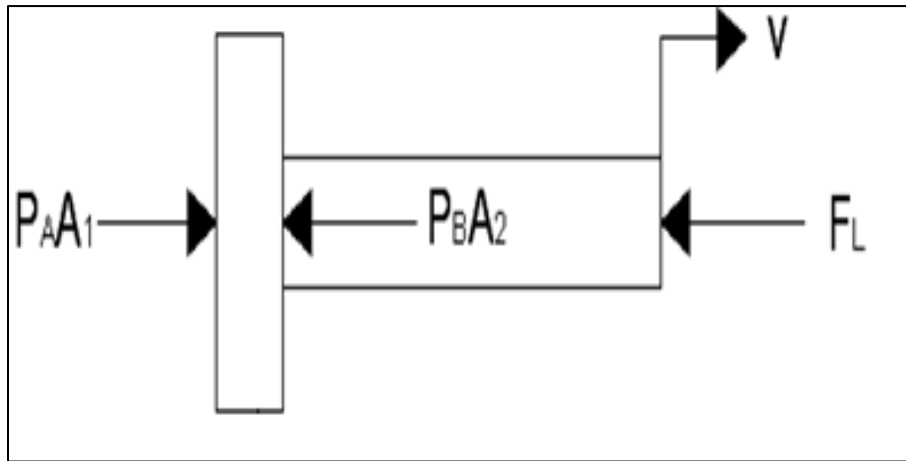
2.1 MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS FÍSICOS

El modelo matemático, como se indicó en el capítulo anterior es la representación matemática simplificada e idealizada de un sistema físico, obtenida por la aplicación de las leyes básicas de la física que rigen su comportamiento, en este caso los modelos usados para el sistema neumático, es decir, válvula y cilindro son los especificados en el libro de Watton (1989) ^[33]

2.1.1 Modelo del cilindro neumático

Para analizar el movimiento de la parte móvil del cilindro se realizó un análisis de las fuerzas que sobre él actúan. Para iniciar análisis se plantea el diagrama de cuerpo libre de la parte móvil del cilindro como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Diagrama de cuerpo libre del cilindro



De donde se obtuvo entonces, al aplicar la segunda Ley de Newton (Σ Fuerzas = masa x aceleración):

$$P_A A_1 - P_B A_2 - F_L = m_p \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (4)$$

Donde:

A_1 y A_2 : área efectiva del pistón en cada una de las recámaras.

P_A y P_B : presión del aceite en cada una de las recámaras.

F_L : fuerza de trabajo.

x : posición del vástago

m_p : masa de la parte móvil

Para este modelo en particular la fuerza de trabajo no solo comprende la fuerza externa que realiza el trabajo, sino también las fuerzas internas que debe vencer el cilindro para su funcionamiento, dentro de las cuales se encuentra la fricción viscosa y seca.

Análisis del fluido

Se debe analizar lo que ocurre con el fluido dentro del cilindro utilizando los principios de la mecánica de fluidos, situación que se presenta en la figura 20. Para un volumen de control determinado la ecuación de continuidad se puede plantear de la siguiente forma

$$\rho_i Q_i - \rho_o Q_o = \frac{d}{dt} \rho V \quad (5)$$

Donde:

ρ_i y ρ_o : densidad del fluido en la entrada y en la salida del volumen de control respectivamente.

Q_i y Q_o : flujo volumétrico en la entrada y en la salida del volumen de control respectivamente.

ρ : densidad del fluido en el volumen de control

V: volumen del fluido dentro del volumen de control

Se asumió una densidad promedio y se utilizó la definición del módulo de Bulk (Watton, J, 1989)^[33], por lo tanto la ecuación se escribe:

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (6)$$

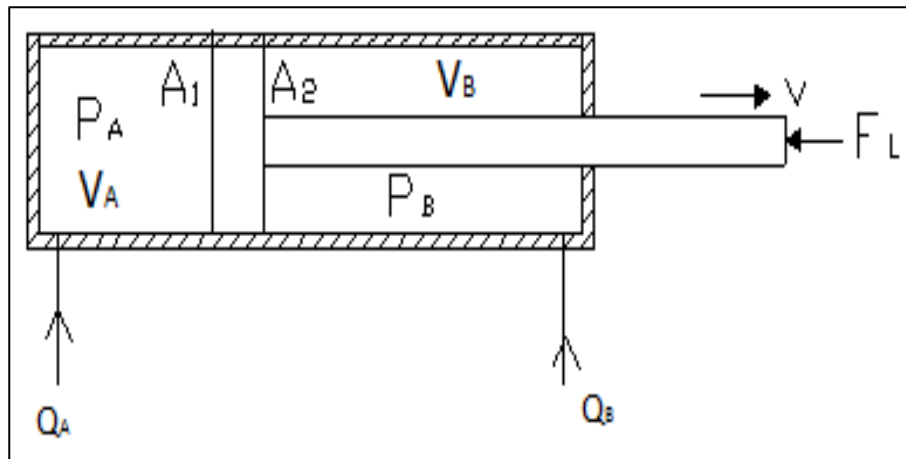
Donde:

P: Presión

β_e : módulo de compresibilidad efectivo (fluido y contenedor)

Aplicando la ecuación a cada una de las recámaras del cilindro para cada una de las situaciones posibles, es decir, cuando el cilindro está extendiéndose y cuando está retrayéndose, se obtuvo entonces:

Figura 20. Análisis del fluido en el cilindro



Fuente: WATTON Jhon, (1989)^[33]

- Extensión:

$$Q_A - 0 = \frac{dV_A}{dt} + \frac{V_A}{\beta_e} \frac{dP_A}{dt} \quad (7)$$

$$0 - Q_B = \frac{dV_B}{dt} + \frac{V_B}{\beta_e} \frac{dP_B}{dt} \quad (8)$$

- Retracción

$$Q_B - 0 = \frac{dV_B}{dt} + \frac{V_B}{\beta_e} \frac{dP_B}{dt} \quad (9)$$

$$0 - Q_A = \frac{dV_A}{dt} + \frac{V_A}{\beta_e} \frac{dP_A}{dt} \quad (10)$$

Se llevaron las expresiones de tal forma que se involucrará la posición que es la variable que se requiere controlar, expresando el caudal como el producto de la velocidad de la parte móvil por el área, entonces las expresiones son:

- Extensión

$$Q_A = A_1 \frac{dx}{dt} + \frac{V_A}{\beta_e} \frac{dP_A}{dt} \quad (11)$$

$$Q_B = A_2 \frac{dx}{dt} - \frac{V_B}{\beta_e} \frac{dP_B}{dt} \quad (12)$$

- Retracción

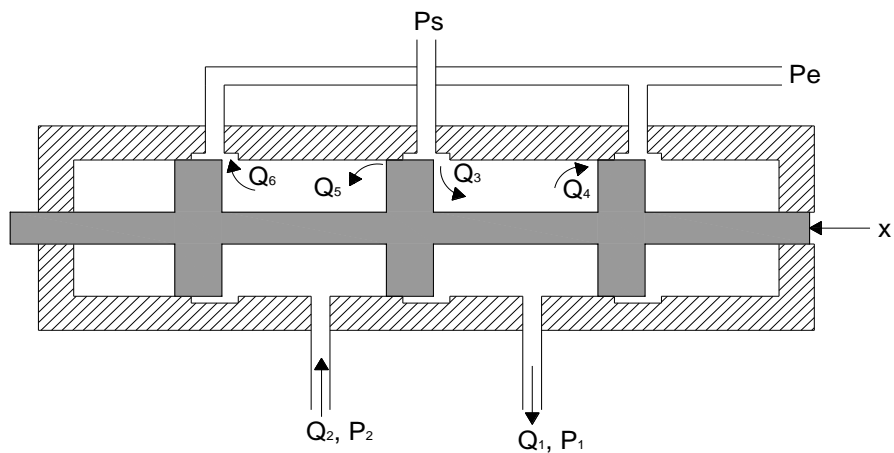
$$Q_B = A_2 \frac{dx}{dt} + \frac{V_B}{\beta_e} \frac{dP_B}{dt} \quad (13)$$

$$Q_A = A_1 \frac{dx}{dt} - \frac{V_A}{\beta_e} \frac{dP_A}{dt} \quad (14)$$

2.1.2 Modelo de la válvula proporcional

La válvula con la cual se trabajó es una válvula críticamente traslapada, en la cual los puertos y los resaltos coinciden exactamente produciendo que ante un pequeño movimiento del spool se permite el paso de fluido hacia los puertos de salida, como se ve en la figura 21. El modelo que se utilizó es una adaptación del presentado por Watton (1989)^[33].

Figura 21. Análisis de caudales en la válvula



Fuente: Adaptación de Watton(1989) ^[33]

Las ecuaciones de continuidad del flujo son:

$$Q_1 = Q_3 - Q_4 \quad (15)$$

$$Q_2 = Q_6 - Q_5 \quad (16)$$

Donde:

Q_1 y Q_2 : Caudales de salida hacia la carga

Q_4 y Q_5 : Caudales de fuga

Q_3 : Caudal de suministro

Q_6 : Caudal de retorno

Se supuso que las pérdidas son despreciables y se aplicó la definición de caudal por una restricción, obteniendo entonces:

$$Q_1 = Q_3 = C_q a \sqrt{\frac{2(P_s - P_1)}{\rho}} \quad (17)$$

$$Q_2 = Q_6 = C_q a \sqrt{\frac{2(P_2 - P_e)}{\rho}} \quad (18)$$

Donde:

C_q : Coeficiente de flujo, que es dependiente de la construcción de la válvula.

a : Área de la restricción.

Se consideró que la presión de escape P_e era la presión atmosférica y que el área se podía expresar en función del gradiente de área y el desplazamiento del spool de la válvula, es decir:

$$a = w * x \quad (19)$$

Y que el desplazamiento es proporcional a la corriente, de tal forma que:

$$x = K_i * i \quad (20)$$

Las expresiones para los caudales pueden ser escritos de la siguiente forma:

$$Q_1 = K_f i \sqrt{\frac{2(P_s - P_1)}{\rho}} \quad (21)$$

$$Q_2 = K_f i \sqrt{\frac{2(P_2)}{\rho}} \quad (22)$$

Con:

$$K_f = C_q w K_i \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (23)$$

Cuando la corriente aplicada a la válvula es de 12mA, el spool de ella se encuentra en el punto medio, a partir de este valor de corriente la conexión entre los puertos de la válvula cambian, y la presión de suministro es dirigida hacia el puerto número 4.

De tal forma que las expresiones par el caudal pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$Q_1 = Z_2 K_f i \sqrt{|P_s - P_1|} \text{sign}(P_s - P_1) + Z_1 K_f i \sqrt{P_1} \quad (24)$$

$$Q_2 = Z_2 K_f i \sqrt{P_2} + Z_1 K_f i \sqrt{|P_s - P_2|} \text{sign}(P_s - P_2) \quad (25)$$

Donde:

i: Corriente suministrada

Ps: Presión de suministro

P_1, P_2 : Presiones de salida de la válvula, correspondientes a P_A y P_B , del cilindro si las pérdidas en las mangueras son despreciables

Para

$$i < 12mA, \quad Z_2 = 1, \quad Z_1 = 0 \quad (26)$$

Y

$$i > 12mA, \quad Z_1 = 1, \quad Z_2 = 0 \quad (27)$$

Al igual que con el cilindro el sistema se puede dividir en extensión y retracción, quedando entonces:

- Extensión ($4mA < i < 12mA$)

$$Q_1 = K_f (0.16 + i) \sqrt{|P_s - P_A|} \text{sign}(P_s - P_A) \quad (28)$$

$$Q_2 = K_f (0.16 + i) \sqrt{P_B} \quad (29)$$

- Retracción ($12mA < i < 20mA$)

$$Q_1 = K_f (i - 0.16) \sqrt{P_A} \quad (30)$$

$$Q_2 = K_f (i - 0.16) \sqrt{|P_s - P_B|} \text{sign}(P_s - P_B) \quad (31)$$

2.1.3 Modelo de la válvula conectada al cilindro

El análisis debe realizarse para cada una de las fases del movimiento, es decir, extensión y retracción.

- Extensión ($4\text{mA} < i < 12\text{mA}$)

Las ecuaciones que gobiernan entonces el movimiento del cilindro son:

$$Q_1 = A_1 \frac{dx}{dt} + C_A \frac{dP_A}{dt} \quad (32)$$

$$Q_2 = A_2 \frac{dx}{dt} - C_B \frac{dP_B}{dt} \quad (33)$$

$$P_A A_1 - P_B A_2 = m_p \frac{d^2 x}{dt^2} + F_L \quad (34)$$

Para la válvula se tiene que:

$$Q_1 = K_f (0.16 + i) \sqrt{|P_s - P_A|} \text{sign}(P_s - P_A) \quad (35)$$

$$Q_2 = K_f (0.16 + i) \sqrt{P_B} \quad (36)$$

Al realizar la transformada de Laplace de las ecuaciones del cilindro se tiene:

$$Q_1(s) = A_1 sX(s) + C_A sP_A(s) \quad (37)$$

$$Q_2(s) = A_2 sX(s) - C_B sP_B(s) \quad (38)$$

$$P_A(s)A_1 - P_B(s)A_2 = m_p s^2 X(s) + F_L(s) \quad (39)$$

Despejando las presiones de las dos primeras ecuaciones, se tiene:

$$P_A(s) = \frac{Q_1(s) - A_1 s X(s)}{C_A s} \quad (40)$$

$$P_B(s) = \frac{A_2 s X(s) - Q_2(s)}{C_B s} \quad (41)$$

Para el caso de la válvula, al ser ecuaciones no lineales se debió realizar la linealización de las mismas alrededor de un punto de operación, suponiendo que la presión de suministro es constante, se tiene entonces:

$$q_1 = C_1 i + C_2 P_A + C_3 \quad (42)$$

Donde:

C_3 : caudal en el punto de operación seleccionado

C_1, C_2 : constantes

$$C_1 = \left. \frac{\partial q_1}{\partial i} \right|_{P_o} = K_f \sqrt{P_s - \overline{P_A}} \quad (43)$$

$$C_2 = \left. \frac{\partial q_1}{\partial P_A} \right|_{P_o} = -K_f (0.16 + i) \left[\frac{1}{2\sqrt{P_s - \overline{P_A}}} \right] \quad (44)$$

Donde:

$\overline{P_A}$: Presión en el punto de operación

Así la expresión para el caudal luego de realizar la transformación es:

$$Q_1(s) = C_1 I(s) + C_2 P_A(s) + C_3 \quad (45)$$

El punto alrededor del cual se realizó la linealización es el de $i = 12$ mA, debido a que es la corriente a la cual la válvula permanece en el centro de su posición de tal forma que los caudales eran nulos, es decir $C_3 = 0$.

Para el caudal dos tomando en cuenta las mismas consideraciones, se tiene:

$$q_2 = C_4 i + C_5 P_B + C_6 \quad (46)$$

$$C_4 = \left. \frac{\partial q_2}{\partial i} \right|_{P_o} = K_f \sqrt{P_B} \quad (47)$$

$$C_5 = \left. \frac{\partial q_2}{\partial P_B} \right|_{P_o} = \frac{K_f (0.16 + i)}{2\sqrt{P_B}} \quad (48)$$

$$Q_2(s) = C_4 I(s) + C_5 P_B(s) + C_6 \quad (49)$$

Como el caudal es nulo también en el caso de la salida, $C_6 = 0$.

Sustituyendo las expresiones de caudal en las de la presión encontradas para el cilindro:

$$P_A(s) = \frac{C_1 I(s) + C_2 P_A(s) - A_1 s X(s)}{C_A s} \quad (50)$$

$$P_A(s) \left(1 - \frac{C_2}{C_A s} \right) = \frac{C_1 I(s) - A_1 s X(s)}{C_A s} \quad (51)$$

$$P_A(s) = \frac{C_1 I(s) - A_1 s X(s)}{C_A s - C_2} \quad (52)$$

$$P_B(s) = \frac{A_2 s X(s) - C_4 I(s) - C_5 P_B(s)}{C_B s}$$

(53)

$$P_B(s) \left(1 + \frac{C_5}{C_B s} \right) = \frac{A_2 s X(s) - C_4 I(s)}{C_B s} \quad (54)$$

$$P_B(s) = \frac{A_2 s X(s) - C_4 I(s)}{C_B s + C_5} \quad (55)$$

Reemplazando las expresiones de presión en el modelo de fuerzas, se obtuvo entonces:

$$\frac{C_1 I(s) - A_1 s X(s)}{C_A s - C_2} A_1 - \frac{A_2 s X(s) - C_4 I(s)}{C_B s + C_5} A_2 = m_p s^2 X(s) + F_L(s) \quad (56)$$

En primera instancia se consideró que la fuerza de carga era nula y la única entrada del sistema era la corriente, para lo cual se obtuvo entonces:

$$\frac{C_1 I(s) A_1}{C_A s - C_2} + \frac{A_1^2 s X(s)}{C_A s - C_2} - \frac{A_2^2 s X(s)}{C_B s + C_5} + \frac{C_4 I(s) A_2}{C_B s + C_5} = m_p s^2 X(s) \quad (57)$$

Organizando la expresión se obtuvo:

$$I(s) \left(\frac{C_1 A_1}{C_A s - C_2} + \frac{C_4 A_2}{C_B s + C_5} \right) = X(s) \left(m_p s^2 + s \left(\frac{A_1^2}{C_A s - C_2} + \frac{A_2^2}{C_B s + C_5} \right) \right) \quad (58)$$

De donde:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{\left(\frac{C_1 A_1}{C_A s - C_2} + \frac{C_4 A_2}{C_B s + C_5} \right)}{\left(m_p s^2 + s \left(\frac{A_1^2}{C_A s - C_2} + \frac{A_2^2}{C_B s + C_5} \right) \right)} \quad (59)$$

Manipulando algebraicamente se obtuvo:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{s + \alpha}{\beta_1 s^4 + \beta_2 s^3 + \beta_3 s^2 + \beta_4 s} \quad (60)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{(C_1 A_1 C_5 - C_4 A_2 C_2)}{(C_1 A_1 C_B + C_4 A_2 C_A)} \quad (61)$$

$$\beta_1 = m_p C_A C_B \quad (62)$$

$$\beta_2 = m_p C_A C_5 - m_p C_2 C_B \quad (63)$$

$$\beta_3 = A_1^2 C_B + A_2^2 C_A - m_p C_2 C_5 \quad (64)$$

$$\beta_4 = A_1^2 C_5 - A_2^2 C_2 \quad (65)$$

Luego se supuso que la corriente era nula y la fuerza de la carga no lo era, por lo tanto se obtuvo:

$$-\frac{A_1^2 s X(s)}{C_A s - C_2} - \frac{A_2^2 s X(s)}{C_B s + C_5} = m_p s^2 X(s) + F_L(s) \quad (66)$$

$$\frac{X(s)}{F_L(s)} = -\frac{1}{\left(m_p s^2 + s \left(\frac{A_1^2}{C_A s - C_2} + \frac{A_2^2}{C_B s + C_5} \right) \right)} \quad (67)$$

$$\frac{X(s)}{F_L(s)} = -\frac{(C_B s + C_5)(C_A s - C_2)}{(m_p s^2)(C_A s - C_2)(C_B s + C_5) + s A_1^2 (C_B s + C_5) + s A_2^2 (C_A s - C_2)} \quad (68)$$

$$\frac{X(s)}{F_L(s)} = -\frac{\alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3}{\beta_1 s^4 + \beta_2 s^3 + \beta_3 s^2 + \beta_4 s} \quad (69)$$

Donde:

$$\alpha_1 = C_B C_A \quad (70)$$

$$\alpha_2 = C_5 C_A - C_B C_2 \quad (71)$$

$$\alpha_3 = -C_5 C_2 \quad (72)$$

- Retracción ($12\text{mA} < i < 20\text{mA}$)

Se desarrolló el mismo procedimiento que para el cilindro en extensión y se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{s + \alpha_4}{\beta_5 s^4 + \beta_6 s^3 + \beta_7 s^2 + \beta_8 s} \quad (73)$$

$$\frac{X(s)}{F_L(s)} = \frac{\alpha_5 s^2 + \alpha_6 s + \alpha_7}{\beta_5 s^4 + \beta_6 s^3 + \beta_7 s^2 + \beta_8 s} \quad (74)$$

Donde:

$$\alpha_4 = \frac{(C_{10} A_2 C_8 - C_{11} A_1 C_7)}{(C_7 A_1 C_B + C_{10} A_2 C_A)} \quad (75)$$

$$\beta_5 = -m_p C_A C_B \quad (76)$$

$$\beta_6 = m_p C_A C_{11} - m_p C_8 C_B \quad (77)$$

$$\beta_7 = m_p C_8 C_{11} + A_1^2 C_B + A_2^2 C_A \quad (78)$$

$$\beta_8 = A_2^2 C_8 - A_1^2 C_{11} \quad (79)$$

$$\alpha_5 = C_B C_A \quad (80)$$

$$\alpha_6 = C_B C_8 - C_{11} C_A \quad (81)$$

$$\alpha_7 = -C_{11}C_8 \quad (82)$$

$$C_7 = \left. \frac{\partial q_1}{\partial i} \right|_{P_o} = K_f \sqrt{P_A} \quad (83)$$

$$C_8 = \left. \frac{\partial q_1}{\partial P_A} \right|_{P_o} = \frac{K_f (i - 0.16)}{2\sqrt{P_A}} \quad (84)$$

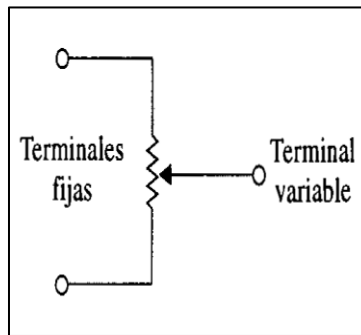
$$C_{10} = \left. \frac{\partial q_2}{\partial i} \right|_{P_o} = K_f \sqrt{P_s - P_B} \quad (85)$$

$$C_{11} = \left. \frac{\partial q_2}{\partial P_B} \right|_{P_o} = -\frac{K_f (i - 0.16)}{2\sqrt{P_s - P_B}} \quad (86)$$

2.1.4 Modelo Del Sensor De Posición Lineal

El sensor de posición tiene el funcionamiento de un potenciómetro, por lo tanto, se comporta como una resistencia variable cuyo voltaje de salida es proporcional a la posición del mismo, como se muestra en la figura 22. El modelo utilizado es el desarrollado por Kuo(1995) ^[18]

Figura 22. Circuito del potenciómetro



Fuente: Kuo(1995)^[18]

El modelo que representa el voltaje de salida del potenciómetro es entonces un sistema de orden cero, el cuál dentro de un sistema de control se comporta como

una ganancia que amplifica la señal de entrada y está representado por la ecuación 87.

$$E(t) = K * x(t) \quad (87)$$

Donde:

$e(t)$: voltaje en la terminal variable

$x(t)$: posición de la terminal variable

K : constante de proporcionalidad

La constante de proporcionalidad es función de la tensión de alimentación en los terminales fijos y el máximo desplazamiento del potenciómetro, por lo tanto:

$$K = \frac{E}{X_{\max}} \quad (88)$$

Donde:

E : Voltaje de alimentación en las terminales fijas, de acuerdo al catálogo del sensor, la tensión debe ser de 10 VDC.

X_{\max} : el máximo recorrido del sensor, en este caso es de 360 mm.

Con estas consideraciones, el modelo teórico del sensor de posición lineal utilizado es entonces:

$$e(t) = \frac{10}{0,360} * x(t) = 27,78 * x(t) \quad (89)$$

2.2 IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL NO PARAMÉTRICA DEL SISTEMA

La identificación del sistema como se dijo en el capítulo inicial consiste en encontrar los parámetros de funcionamiento del mismo por medios experimentales, en este caso se realizó en dos etapas que se explican en la tabla 4, se utilizó un sistema de identificación debido a la cantidad de parámetros desconocidos del modelo desarrollado para el conjunto de válvula y cilindro.

Tabla 4. Identificación de los parámetros del sistema

ETAPAS DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS	
ETAPA	DESCRIPCIÓN
Identificación en lazo abierto de cada elemento	En esta etapa se realizó una identificación de los parámetros de funcionamiento de la válvula proporcional de vías y del sensor de posición lineal, se consideraron modelos estáticos para estos dos elementos debido a que se conocía que su comportamiento era lineal (sistemas de orden cero) en un intervalo de funcionamiento de la válvula y en la totalidad de la carrera del sensor. Por lo tanto el comportamiento de la señal de entrada solo se ve afectado en su magnitud pero no en su forma ni su dinámica.
Identificación en lazo abierto del sistema	Constituyó la etapa final del proceso de identificación, luego de tener los parámetros de funcionamiento de la válvula y el sensor, se identificó todo el sistema en conjunto para encontrar el modelo de todo el sistema que se deseaba controlar.

2.2.1 Identificación de la válvula proporcional

En la identificación de los parámetros de la válvula proporcional, se utilizó un modelo de caja negra, donde la señal de entrada era la corriente y la salida la presión en cada uno de los puertos de salida de la misma. Para lo cual se manejó como sensor de presión el sensor MPX5700DP cuyas características se dan en el anexo 3.

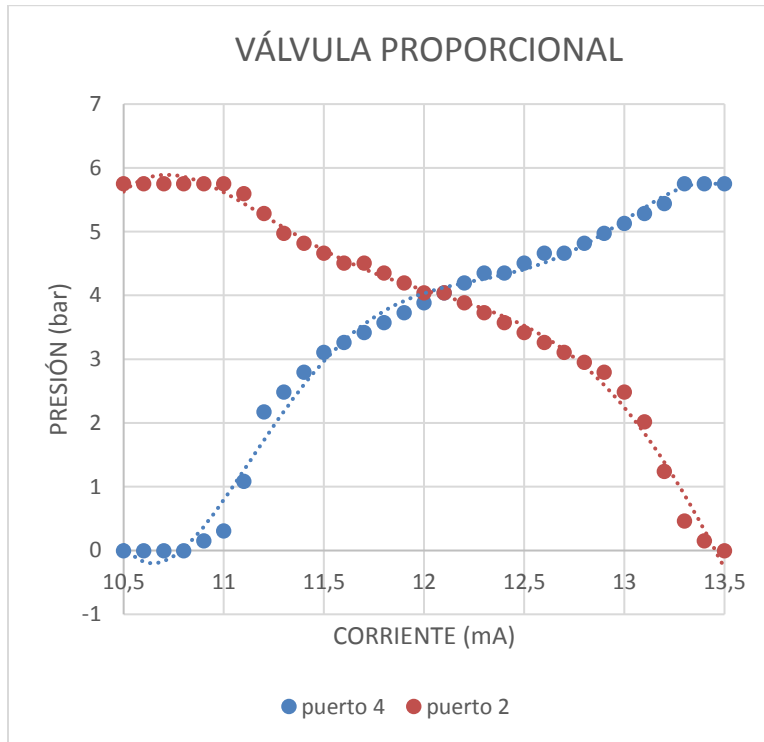
El procedimiento utilizado para la identificación (Adaptación de Fuentes, 2009)^[17], fue una variación de la corriente con intervalos de 0,1 mA con una presión de suministro de 6 bar, se tomaba para cada una de ellas el valor de la presión en

cada uno de los puertos, el proceso se realizó incrementando la escala y disminuyendo la misma, para lo cual se obtuvieron los datos presentados en la tabla 5 y en la figura 23.

Tabla 5. Datos adquiridos de comportamiento de la válvula

IDENTIFICACIÓN VÁLVULA				
CORRIENTE (mA)	Puerto 4		Puerto 2	
	Tensión (V)	Presión (bar)	Tensión (V)	Presión (bar)
10.90	0.30	0.16	3.90	5.76
11.00	0.40	0.31	3.90	5.76
11.10	0.90	1.09	3.80	5.60
11.20	1.60	2.18	3.60	5.29
11.30	1.80	2.49	3.40	4.98
11.40	2.00	2.80	3.30	4.82
11.50	2.20	3.11	3.20	4.67
11.60	2.30	3.27	3.10	4.51
11.70	2.40	3.42	3.10	4.51
11.80	2.50	3.58	3.00	4.36
11.90	2.60	3.73	2.90	4.20
12.00	2.70	3.89	2.80	4.04
12.10	2.80	4.04	2.80	4.04
12.20	2.90	4.20	2.70	3.89
12.30	3.00	4.36	2.60	3.73
12.40	3.00	4.36	2.50	3.58
12.50	3.10	4.51	2.40	3.42
12.60	3.20	4.67	2.30	3.27
12.70	3.20	4.67	2.20	3.11
12.80	3.30	4.82	2.10	2.96
12.90	3.40	4.98	2.00	2.80
13.00	3.50	5.13	1.80	2.49
13.10	3.60	5.29	1.50	2.02
13.20	3.70	5.44	1.00	1.24
13.30	3.90	5.76	0.50	0.47
13.40	3.90	5.76	0.30	0.16
13.50	3.90	5.76	0.20	0.00
13.60	3.90	5.76	0.20	0.00
13.70	3.90	5.76	0.20	0.00

Figura 23. Comportamiento de la válvula



En la figura 23 se observan los datos de la tabla 5 y la línea de tendencia de los mismos, en ella se muestra el comportamiento deseado de una válvula proporcional, lineal alrededor del punto medio (12mA) y una saturación en la presión de suministro, el sistema se operó entonces cerca de este valor para evitar las no linealidades.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento en cada puerto, en el tramo lineal, es decir, entre 11.2 y 13 mA, son:

Puerto 2:

$$P(t) = 1,4954 * i(t) - 14,19 \quad (90)$$

Puerto 4:

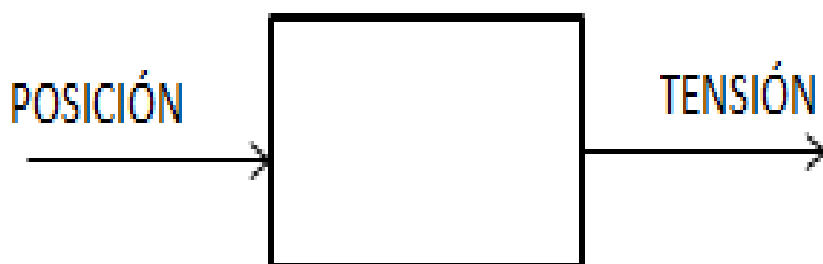
$$P(t) = -1,3863 * i(t) + 20,703 \quad (91)$$

Observando las ecuaciones 90 y 91 que describen el comportamiento de la válvula en el intervalo lineal de su comportamiento, puede considerarse que la válvula en ese intervalo se comporta como un sistema de orden cero, es decir, la forma de la señal de salida (presión) conserva la misma forma de la señal de entrada (corriente), sin importar la forma o dinámica que ella tenga, solamente cambia la magnitud de la misma.

2.2.2 Identificación del sensor de posición lineal

Para la identificación de los parámetros del sensor de posición lineal se utilizó un modelo de caja negra en el cual se tenía como entrada la posición y como salida el voltaje de salida, como se muestra en la figura 24. Como se vio en el modelo, este debe ser lineal y el parámetro necesario es la constante de proporcionalidad.

Figura 24. Proceso de identificación del sensor de posición



En el proceso de identificación se utilizó un flexómetro para medir la posición del cilindro y un voltímetro a la salida del mismo, lo cual generó la tabla 6:

Tabla 6. Proceso de identificación del sensor de posición

DATOS IDENTIFICACIÓN SENSOR DE POSICIÓN			
POSICIÓN (m)	TENSIÓN (V)	POSICIÓN (m)	TENSIÓN (V)
0,007	0,17	0,180	4,60
0,010	0,25	0,185	4,72
0,015	0,37	0,190	4,85
0,020	0,51	0,195	4,98
0,025	0,63	0,200	5,10
0,030	0,76	0,205	5,23
0,035	0,89	0,210	5,35

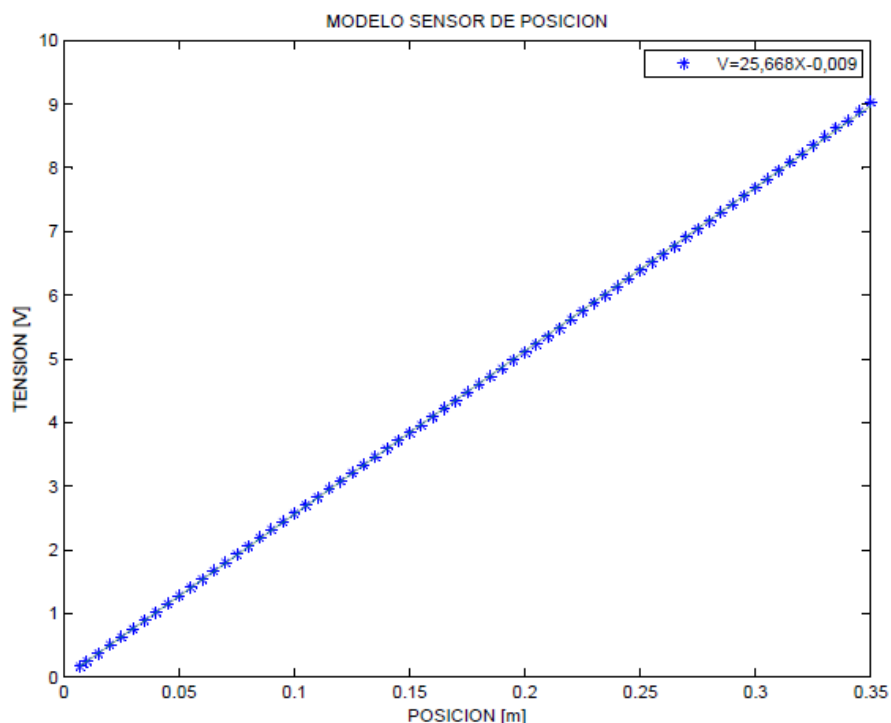
Tabla 6 (continuación)			
0,040	1,02	0,215	5,48
0,045	1,15	0,220	5,62
0,050	1,28	0,225	5,75
0,055	1,41	0,230	5,88
0,060	1,54	0,235	6,00
0,065	1,67	0,240	6,13
0,070	1,80	0,245	6,26
0,075	1,93	0,250	6,39
0,080	2,06	0,255	6,52
0,085	2,19	0,260	6,64
0,090	2,32	0,265	6,77
0,095	2,44	0,270	6,91
0,100	2,57	0,275	7,04
0,105	2,70	0,280	7,16
0,110	2,83	0,285	7,30
0,115	2,96	0,290	7,43
0,120	3,08	0,295	7,56
0,125	3,21	0,300	7,69
0,130	3,33	0,305	7,82
0,135	3,46	0,310	7,96
0,140	3,59	0,315	8,09
0,145	3,72	0,320	8,22
0,150	3,84	0,325	8,36
0,155	3,96	0,330	8,49
0,160	4,09	0,335	8,63
0,165	4,22	0,340	8,74
0,170	4,34	0,345	8,89
0,175	4,47	0,350	9,03

Luego del análisis de los datos experimentales, se obtuvo entonces que el modelo experimental del sensor de posición lineal es:

$$e(t) = 25,668 * x(t) \quad (92)$$

La gráfica que representa el comportamiento se presenta en la figura 25, la cual presenta un comportamiento totalmente lineal.

Figura 25. Respuesta del sensor de posición



Al igual que el modelo de la válvula se considera este como un sistema de orden cero, es decir, el sensor solo aporta una ganancia en el lazo de control.

2.2.3 Identificación del sistema en lazo abierto

La identificación de los parámetros del sistema en conjunto, se hizo también basándose en un sistema de caja negra, en donde la entrada al sistema fue la corriente de entrada a la válvula proporcional y la salida la tensión marcada por el potenciómetro, tal como se muestra en la figura 26.

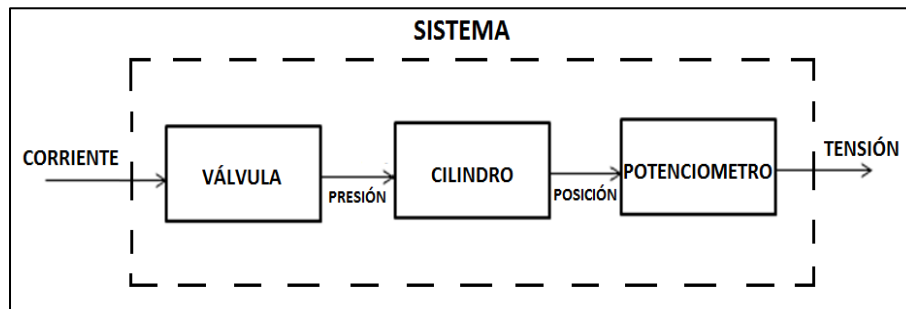
Tomando en cuenta la identificación previa realizada a la válvula, se decidió realizar el ensayo en el rango de proporcionalidad de la válvula, por lo tanto, se realizaron ensayos con corrientes que van desde 10,5 mA hasta 13,5 mA.

Para la adquisición de datos se utilizó la tarjeta de adquisición de datos DAQ (NI USB-6008) National Instruments, cuyas especificaciones se dan en el anexo 1, para la medición de la tensión en tiempo real. La señal de corriente utilizada para comandar la válvula se obtuvo forzándola desde el PLC S7-1200.

Los dos modelos previos, es decir, el de la válvula proporcional y del sensor de posición, no se tomaron en cuenta para este desarrollo, debido a que al ser dos sistemas que se representan solamente como ganancias dentro del lazo de control, estas dos quedan inmersas dentro del modelo general del sistema.

En la identificación se usó el toolbox de identificación que proporciona Matlab, cuyas técnicas de identificación y estructura interna se explican con mayor detenimiento en el anexo 1.

Figura 26. Identificación del sistema en lazo abierto



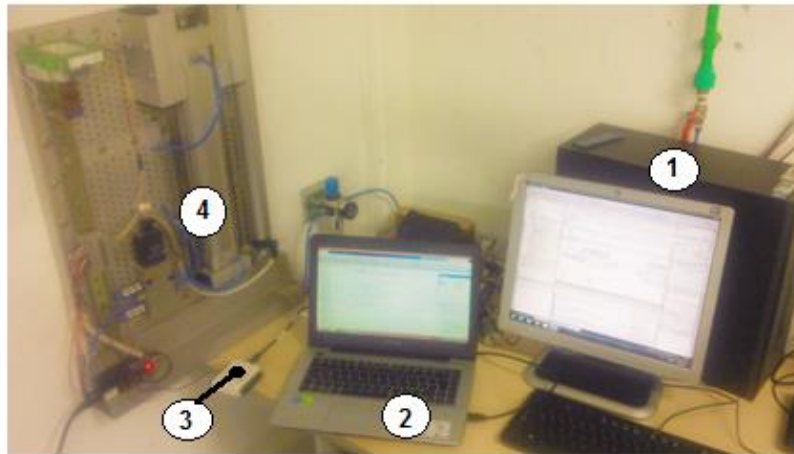
2.2.3.1 Descripción del proceso

El proceso de adquisición de datos e identificación del sistema consistió en enviar señales de corriente de valores constantes al cilindro en el rango anteriormente mencionado con variaciones de 0,1mA y tomar datos de la tensión a la salida del potenciómetro, es decir, se utilizaron de prueba entradas tipo escalón de distinta amplitud y se medía en tiempo real la salida de tensión.

Esta medición se realizó bajo tres condiciones de presión distintas: 6 bar, 7 bar y 8 bar; igualmente se realizaron pruebas con solo la carga del sistema de guías y con una carga externa para los tres valores de presión.

Con los datos adquiridos y usando MATLAB y EXCEL se realizó el proceso de identificación de la misma forma descrita en el anexo 1. En la figura 27 se observa el proceso de adquisición de datos.

Figura 27. Proceso de adquisición de datos



1. Computador usado para programar el autómata; 2. Computador utilizado para programar la adquisición; 3. Tarjeta de adquisición de datos; 4. Sistema controlado

2.2.3.2 Análisis de los datos

2.2.3.2.1 Respuesta del sistema ante entradas escalón

Cuando se adquirieron los datos del sistema para los distintos valores de corriente, presión y carga, se obtuvieron gráficas como las mostradas, las cuales corresponden a:

- Corriente 10,5 mA, presión 6 bar y sin carga (figura 28).
- Corriente 12,5 mA, presión 6 bar y sin carga. (figura 29)

Las gráficas obtenidas presentan una forma similar, donde se ve una zona inicial donde la tensión es constante debido a la utilización de un temporizador para evitar problemas con la parte inicial del proceso de adquisición con la tarjeta y al

tiempo que se tarda en adquirir la presión suficiente para comenzar el movimiento, una segunda fase donde el cilindro se mueve a una velocidad constante con un pequeño retardo inicial y una tercera fase donde el cilindro logra el máximo desplazamiento y la tensión permanece constante. La variación entre las distintas pruebas está en la pendiente, es decir, la velocidad de salida del cilindro y el tiempo de retardo inicial.

Figura 28. Comportamiento del cilindro ante una entrada de 10,5 mA

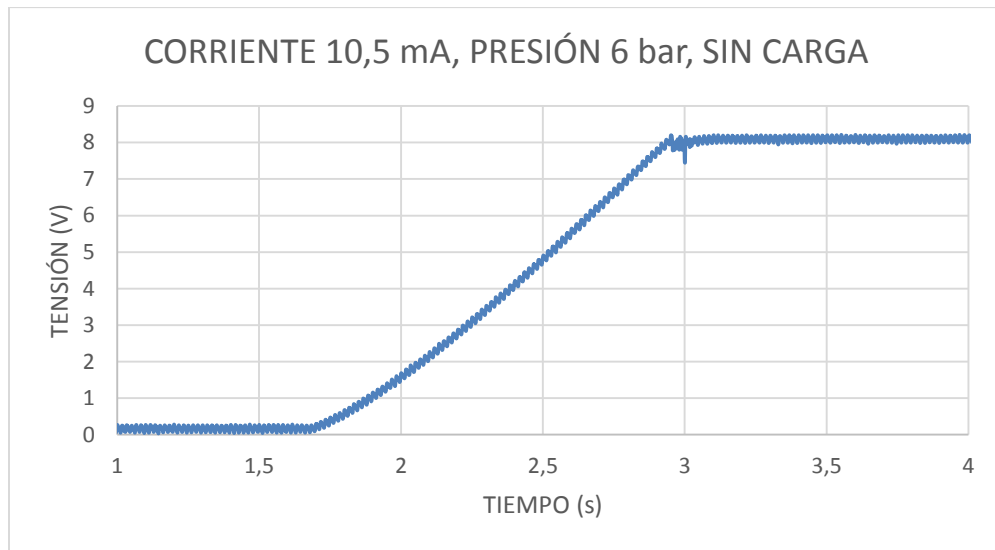
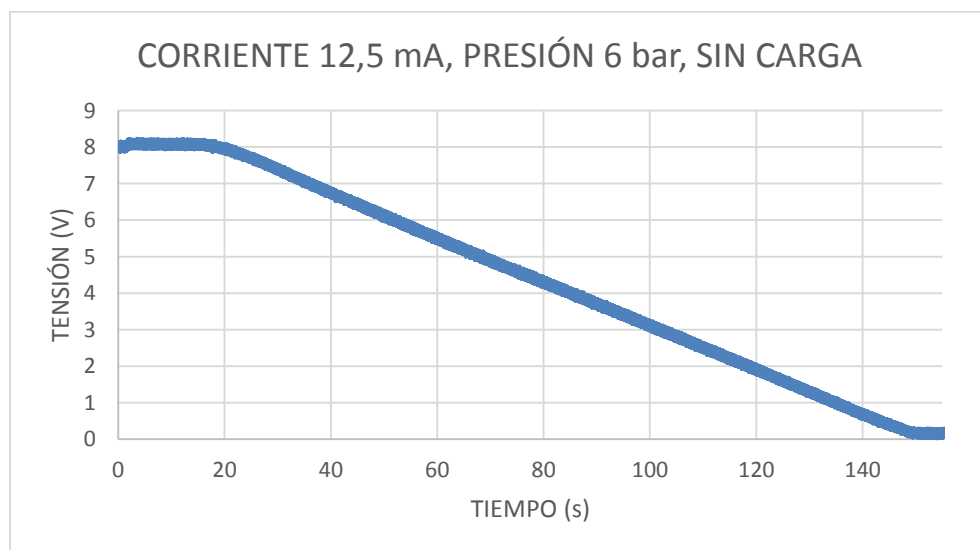


Figura 29. Comportamiento del cilindro ante una entrada de 12,5 mA



El retardo aumentaba en las cercanías del punto medio del desplazamiento del spool de la válvula, es decir, 12 mA, igualmente, la velocidad disminuía a medida que se acercaba la corriente a este valor. El cilindro permaneció estático cuando la corriente estuvo entre 12 y 12,3 mA.

Con los datos obtenidos se utilizó el “Toolbox” de identificación de MATLAB para obtener la relación entre la corriente y la tensión, en una primera aproximación, se utilizaron dos tipos de identificación que se pueden usar en este “Toolbox”:

- Modelos de función de transferencia, permite estimar un modelo relacionando los datos de entrada y salida de un sistema por medio de una función de transferencia, para la cual se define el número de polos y ceros que posee la función.
- Modelos de proceso: permite estimar el modelo de un proceso continuo en el tiempo, definiendo el tipo de proceso. Esta opción permite dar como parámetros de entrada, el orden del sistema (0,1, 2 ó 3), la existencia de retardo en el tiempo, de un cero en la función, y/o de un integrador.

Para el caso de modelos de función de transferencia se comenzó inicialmente planteando varias combinaciones de ceros y polos, dando la posibilidad de tener sistemas de segundo hasta de cuarto orden, opción que se acerca al modelo teórico encontrado. En el caso de los modelos de proceso, se utilizaron todas las posibles combinaciones permitidas.

Con todas las combinaciones utilizando prueba y error, se buscaba que existiera un modelo con parámetros semejantes para los distintos valores de la entrada de corriente de la válvula, es decir, ante distintos valores de la entrada, se esperaba obtener un modelo similar del sistema, luego de este primer análisis se logró identificar que el modelo en el que más había una tendencia a converger los parámetros del mismo ante distintas entradas era el modelo de dos polos y un cero. Pero a pesar de existir una tendencia a converger los resultados no fueron concluyentes, por lo cual se procedió a configurar otros métodos para la identificación del sistema, los cuales se describen en los siguientes títulos.

En la tabla 7 se muestran algunos de los modelos obtenidos en el proceso de identificación.

Tabla 7. Modelo identificado con entradas constantes

CORRIENTE (mA)	MODELO
11,3	$\frac{0.000874s - 0.00039}{s^2 + 0.2792s + 5.59e^{-3}}$
11,5	$\frac{0.008658s + 0.002084}{s^2 + 0.1356s + 8.51e^{-10}}$
11,7	$\frac{-0.00676s + 0.00171}{s^2 + 0.1732s + 2.65e^{-5}}$
11,9	$\frac{-0.0003156s + 0.0006371}{s^2 + 0.1349s + 5.896e^{-14}}$
12,5	$\frac{434.3s - 4.966}{s^2 + 967.5s + 1.35e^{-10}}$
12,7	$\frac{515.4s - 8.808}{s^2 + 860.4s + 5.76e^{-10}}$
12,9	$\frac{1796s - 74.08}{s^2 + 4282s + 5.87e^{-2}}$

2.2.3.2.2 Identificación basada en la velocidad

Luego del proceso inicial basado directamente en la posición se realizó un proceso de identificación del sistema basado en la velocidad, para este caso se buscó la velocidad de avance del cilindro, es decir, la pendiente de la recta obtenida con cada uno de los valores de corriente suministrada a la válvula dada en unidades de tensión sobre tiempo (voltio/segundo). Este análisis se realizó con cada una de las presiones y con las condiciones de carga especificadas anteriormente. Los datos se presentan en la tabla 8, donde se observa el cambio de tensión con respecto al tiempo y su correspondiente velocidad (mm/s).

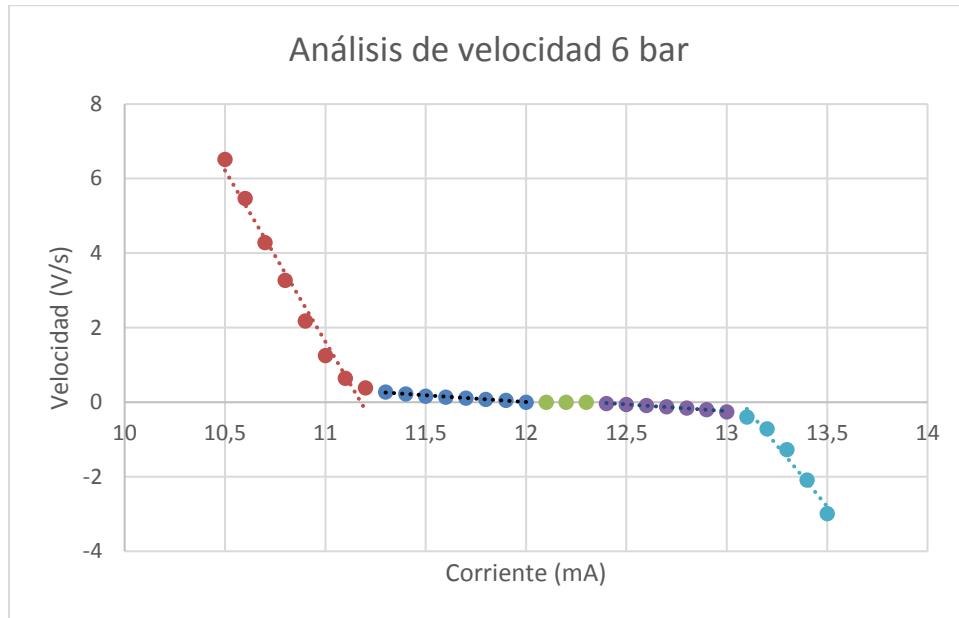
En la figura 30 se muestran los datos obtenidos cuando se tiene una presión de trabajo de 6 bar, mostrando cada una de las zonas de trabajo del sistema y la línea de tendencia de los datos.

Tabla 8. Datos de velocidad del cilindro ante distintas corrientes

ANÁLISIS DE VELOCIDAD SIN CARGA						
Presión (bar)	6		7		8	
	V/s	mm/s	V/s	mm/s	V/s	mm/s
Corriente(mA)						
10,5	6,5164	253,873	6,1021	237,732	6,3293	246,583
10,6	5,4752	213,308	4,8522	189,037	5,4485	212,268
10,7	4,2863	166,990	4,2252	164,610	4,189	163,199
10,8	3,2756	127,614	2,9813	116,149	3,1992	124,638
10,9	2,1864	85,180	2,0094	78,284	2,1278	82,897
11,0	1,2598	49,081	1,2648	49,275	1,2819	49,942
11,1	0,6454	25,144	0,687	26,765	0,6328	24,653
11,2	0,3907	15,221	0,362	14,103	0,3669	14,294
11,3	0,2768	10,784	0,2735	10,655	0,2649	10,320
11,4	0,2218	8,641	0,2023	7,881	0,1996	7,776
11,5	0,1692	6,592	0,174	6,779	0,1735	6,759
11,6	0,1403	5,466	0,1381	5,380	0,1459	5,684
11,7	0,1142	4,449	0,111	4,324	0,1164	4,535
11,8	0,0835	3,253	0,0857	3,339	0,0885	3,448
11,9	0,0569	2,217	0,0665	2,591	0,0653	2,544
12,0	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
12,1	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
12,2	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
12,3	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
12,4	-0,0339	-1,321	0,000	0,000	0,000	0,000
12,5	-0,0605	-2,357	-0,0514	-2,002	-0,0443	-1,726
12,6	-0,0856	-3,335	-0,0802	-3,125	-0,0705	-2,747
12,7	-0,1177	-4,585	-0,1066	-4,153	-0,0979	-3,814
12,8	-0,1542	-6,007	-0,1385	-5,396	-0,1332	-5,189
12,9	-0,1970	-7,675	-0,183	-7,129	-0,173	-6,740
13,0	-0,2571	-10,016	-0,2345	-9,136	-0,2086	-8,127
13,1	-0,3916	-15,256	-0,365	-14,220	-0,3501	-13,640
13,2	-0,7126	-27,762	-0,658	-25,635	-0,6547	-25,506
13,3	-1,2670	-49,361	-1,2644	-49,260	-1,2678	-49,392
13,4	-2,0864	-81,284	-1,9724	-76,843	-2,0689	-80,602
13,5	-2,9828	-116,21	-2,8843	-112,369	-2,9628	-115,428

Analizando los datos obtenidos se puede observar que el sistema presenta varias zonas de trabajo, las cuales están directamente ligadas con el comportamiento de la válvula proporcional, mostrando igualmente una zona muerta en el rango de 12 a 12,4 mA, de acuerdo a los datos de la tabla 8 se encontró que el cambio en el comportamiento de la velocidad no difiere en modo significativo ante el cambio de presión del sistema.

Figura 30. Relación entre velocidad del cilindro y corriente en la válvula



Tomando en cuenta el comportamiento de la válvula se decide entonces utilizar solo el rango comprendido entre 11,3 y 13 mA, que es el rango donde se observa mayor linealidad del sistema y que comprende las fases de entrada y salida del cilindro.

La relación existente entre el cambio del voltaje en el tiempo (velocidad) y la corriente para el rango lineal de la válvula alrededor del punto central del spool es:

$$\frac{dV}{dt} = -0,2468i + 3,2262 \quad (93)$$

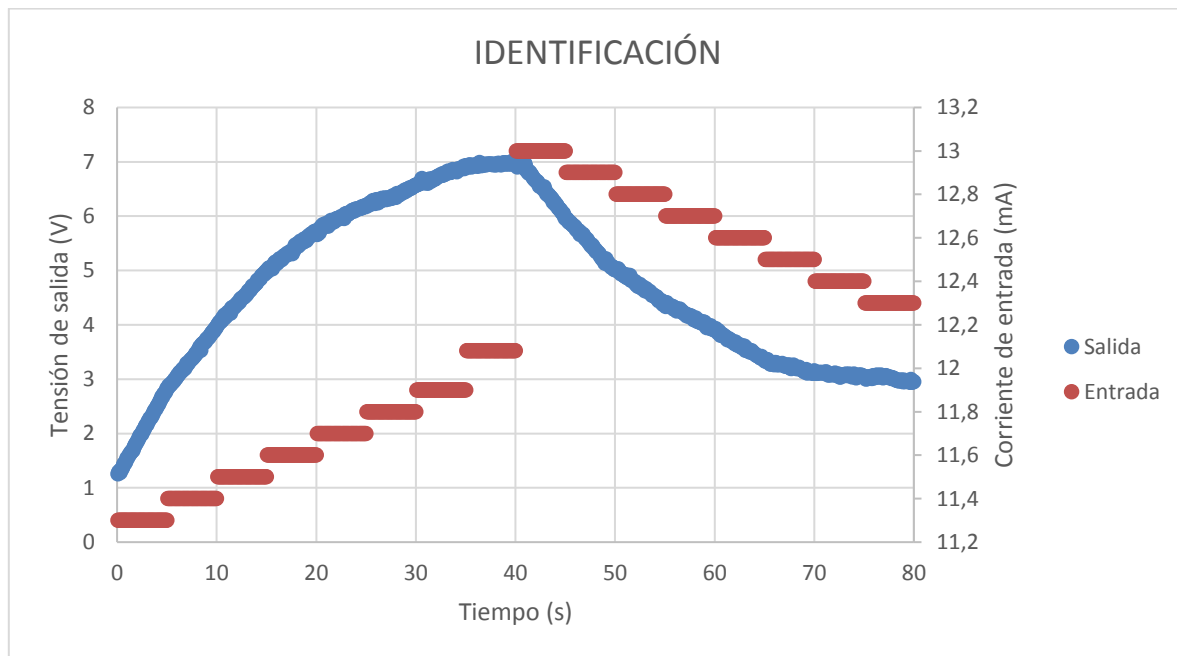
En este análisis estático no se tomó en cuenta la dinámica del sistema, debido a que solo se obtiene el modelo con la respuesta del sistema en estado estable, el resultado aunque fue coherente con el funcionamiento de la válvula y el cilindro, no resulta confiable para efectos de control, por lo cual se procede a realizar un último proceso de adquisición de datos e identificación del sistema, en el cual si se tomó en cuenta la dinámica del mismo.

2.2.3.2.3 Respuesta ante una entrada rampa escalonada

Buscando abarcar todo el rango mencionado en el proceso anterior y utilizando la misma entrada (corriente en la válvula) y salida (tensión del potenciómetro), se realizó otro modelo de adquisición de datos en el cual se generó una rampa escalonada en la entrada y se registró el valor de la salida.

Los datos obtenidos se presentan en la figura 31, y sus valores se encuentran en el anexo 2:

Figura 31. Comportamiento del sistema ante una rampa escalonada



Para la identificación y posterior validación del sistema, se utilizó nuevamente el "Toolbox" de identificación de Matlab, siguiendo un procedimiento igual al descrito en el primer caso de la identificación, es decir, plantear los distintos modelos que pueden generarse y buscar cuál de ellos es el que mejor se aproxima al comportamiento real medido. Como se deseaba tener la oportunidad de validar el modelo, los datos fueron divididos para de esa forma tener una serie de datos que permitiera obtener el modelo y otra serie de datos que permitieran su validación, de esta forma se evitó tener un sobreajuste.

Para poder trabajar con el “Toolbox” los datos deben estar igualmente espaciados en el tiempo por lo cual se decidió obtener el modelo con la mitad de los datos que se muestran en el anexo 2, para tener un tiempo de muestreo de 0.2 s, los demás datos se reservan para la validación del modelo obtenido. Luego de realizar el proceso de identificación se obtuvo que el modelo se puede aproximar a un modelo de cuarto orden con un polo, coincidiendo en el orden con el modelo teórico pero diferenciándose en el número de ceros.

La expresión obtenida como función de transferencia del sistema es:

$$\frac{V(s)}{I(s)} = \frac{0.0004591s + 4.182 \times 10^{-5}}{s^4 + 0.05148s^3 + 0.03418s^2 + 0.0009529s + 0.0001303} \quad (94)$$

Donde la tensión se expresa en voltios y la corriente en mA.

La figura 32 muestra la función obtenida mediante el uso del Toolbox de identificación, y en ella se muestra también el porcentaje de ajuste entre la salida del sistema real y el estimado, la cual fue del 93,36%

La figura 33 presenta la comparación entre la salida real del sistema mostrada en la línea de color negro y la salida obtenida con el modelo identificado ante la misma entrada, convirtiéndose la gráfica en una primera validación del modelo identificado experimentalmente.

Para comprobar la validez del modelo se realizó una comparación estadística de los datos obtenidos empíricamente y los datos arrojados por la simulación del sistema mostrada en la figura 33, la prueba que se utilizó fue la prueba F de Fisher, la cual compara la varianza de los datos obtenidos empíricamente y los datos que se obtienen mediante la simulación del sistema con el modelo identificado. Para la realización de la prueba se obtuvieron 101 datos distribuidos en todo el dominio y pertenecientes a la serie reservada para la validación y se compararon con los obtenidos empíricamente, estos datos se muestran en la tabla 9.

Figura 32. Modelo obtenido utilizando el "Toolbox: Ident" de Matlab

```

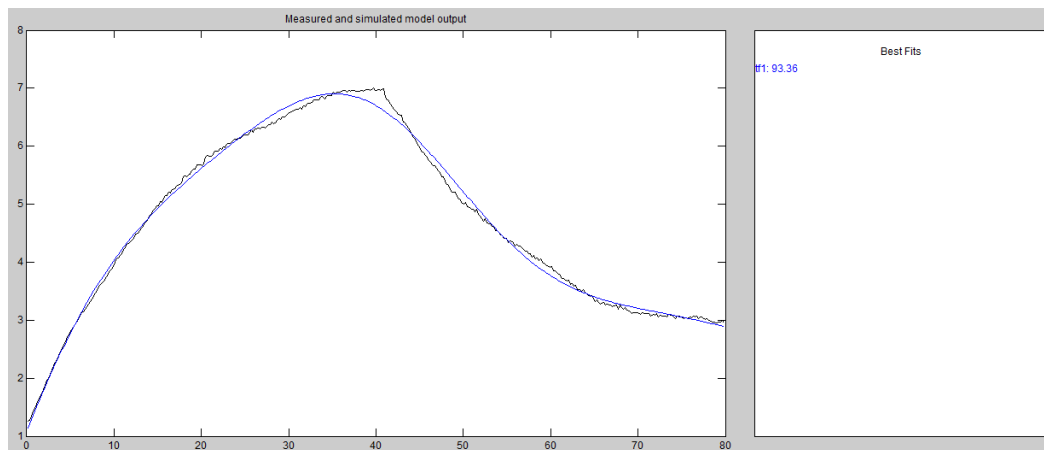
0.0004591 s + 4.182e-05
-----
s^4 + 0.05148 s^3 + 0.03418 s^2 + 0.0009529 s + 0.0001303
Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 4   Number of zeros: 1
  Number of free coefficients: 6
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 93.36% (simulation focus)

```

Figura 33. Comparación sistema real y simulado



Mediante el uso de Excel se efectuó la prueba obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 10. En ella se puede observar que el valor F de los datos es menor que el F crítico, utilizando un grado de significancia de 0.05 (5%), estos resultados indican que no existen diferencias significativas entre los valores empíricos y los valores obtenidos mediante la simulación.

En la figura 34 se presentan los intervalos de confianza para un 99% marcados con líneas punteadas, como se puede observar, los datos se mantienen siempre dentro de ellos.

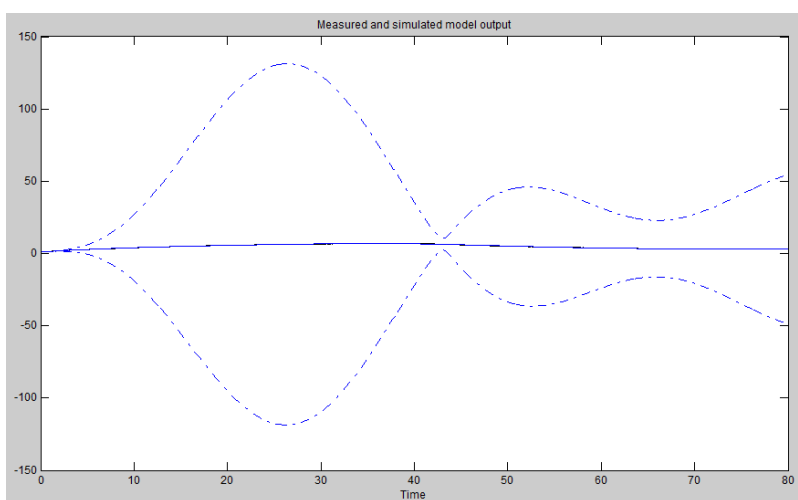
Tabla 9. Comparación de datos reales y simulados

COMPARACIÓN DE DATOS REALES Y SIMULADOS								
Tiempo (s)	Dato real (V)	Dato modelo (V)	Tiempo (s)	Dato real (V)	Dato modelo (V)	Tiempo (s)	Dato real (V)	Dato modelo (V)
0,1	1,2576	1,144	27,2	6,3346	6,446	54,4	4,4384	4,470
0,8	1,4513	1,396	28,0	6,3448	6,523	55,2	4,4078	4,350
1,6	1,6858	1,677	28,8	6,4366	6,595	56,0	4,2957	4,236
2,4	1,9712	1,950	29,6	6,5181	6,662	56,8	4,2345	4,128
3,2	2,2363	2,214	30,4	6,6099	6,721	57,6	4,1631	4,026
4,0	2,4912	2,468	31,2	6,5997	6,774	58,4	4,0714	3,932
4,8	2,7460	2,713	32,0	6,6915	6,818	59,2	3,9490	3,844
5,6	2,9398	2,946	32,8	6,7628	6,854	60,0	3,9083	3,764
6,4	3,1335	3,168	33,6	6,8138	6,880	60,8	3,8165	3,690
7,2	3,3068	3,380	34,4	6,8648	6,896	61,6	3,7248	3,622
8,0	3,4699	3,580	35,2	6,9259	6,902	62,4	3,6228	3,561
8,8	3,6738	3,769	36,0	6,9361	6,896	63,2	3,5616	3,506
9,6	3,8675	3,948	36,8	6,9361	6,879	64,0	3,4699	3,456
10,4	4,0612	4,116	37,6	6,9565	6,851	64,8	3,3883	3,411
11,2	4,2039	4,276	38,4	6,9667	6,811	65,6	3,2762	3,371
12,0	4,3772	4,426	39,2	6,9667	6,759	66,4	3,2660	3,335
12,8	4,5200	4,569	40,0	6,9769	6,695	67,2	3,2558	3,302
13,6	4,7137	4,704	40,8	6,9463	6,620	68,0	3,2252	3,271
14,4	4,8462	4,833	41,6	6,7628	6,535	68,8	3,1742	3,243
15,2	5,0297	4,956	42,4	6,5487	6,439	69,6	3,1233	3,217
16,0	5,1214	5,075	43,2	6,3958	6,334	70,4	3,1131	3,192
16,8	5,2744	5,189	44,0	6,2123	6,221	71,2	3,1335	3,168
17,6	5,3050	5,299	44,8	6,0492	6,100	72,0	3,0825	3,144
18,4	5,5394	5,406	45,6	5,8657	5,973	72,8	3,0825	3,120
19,2	5,6312	5,511	46,4	5,7229	5,840	73,6	3,0621	3,096
20,0	5,7331	5,613	47,2	5,5700	5,704	74,4	3,0519	3,071
20,8	5,8045	5,714	48,0	5,3865	5,565	75,2	3,0009	3,046
21,6	5,8759	5,813	48,8	5,1928	5,423	76,0	3,0213	3,020
22,4	5,9676	5,910	49,6	5,0603	5,281	76,8	3,0417	2,994
23,2	6,0288	6,006	50,4	4,9991	5,140	77,6	3,0417	2,967
24,0	6,1307	6,099	51,2	4,8666	4,999	78,4	2,9805	2,940
24,8	6,1715	6,190	52,0	4,7952	4,861	79,2	2,9703	2,912
25,6	6,2531	6,279	52,8	4,6933	4,727	80,0	2,9499	2,885
26,4	6,2735	6,364	53,6	4,5811	4,596			

Tabla 10. Resultados prueba F de Fisher

PRUEBA F PARA VARIANZAS DE DOS MUESTRAS		
	<i>Datos reales</i>	<i>Datos simulados</i>
Media	4,66621437	4,66644752
Varianza	2,38344552	2,38169475
Observaciones	101	101
Grados de libertad	100	100
F	1,0007351	
P(F<=f) una cola	0,4985379	
Valor crítico para F (una cola)	1,39171955	

Figura 34. Intervalos de confianza para 99%



Tomando en cuenta el ajuste mostrado en la figura 33, los resultados de la prueba F de Fisher de la tabla 10 y el hecho de que se mantenga siempre los datos dentro de los intervalos de confianza del 99%, se consideró entonces que este el modelo expresado en la ecuación 94 representa de forma más cercana el comportamiento del sistema, el cual involucra el rango lineal de la válvula, el comportamiento dinámico y el cilindro en sus dos fases de movimiento (extensión y retracción).

Aunque el modelo identificado corresponde con el comportamiento del sistema, se observó en la ecuación 94 que el término independiente era mucho menor que los otros términos del polinomio del denominador y tomando en cuenta que los modelos del sistema obtenidos teóricamente (ecuaciones 60, 69, 73 y 74) no contenían ese término, se decidió despreciarlo para los cálculos posteriores. Por lo tanto el modelo utilizado para el diseño del controlador fue el dado por la ecuación

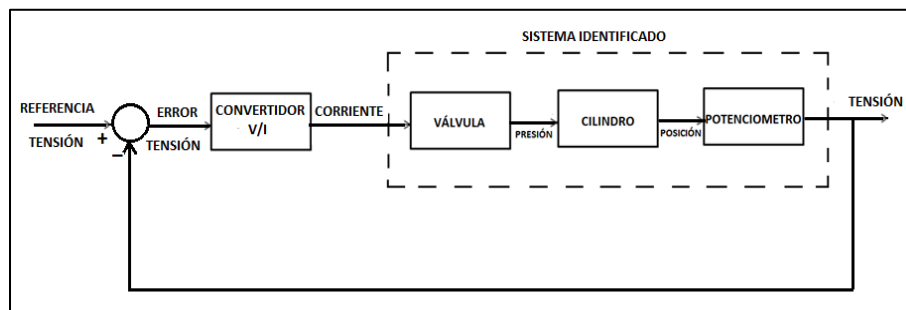
95. Como se observa en la expresión el sistema contiene un integrador el cuál físicamente corresponde al cilindro.

$$\frac{V(s)}{I(s)} = \frac{0.0004591s + 4.182 \times 10^{-5}}{s^4 + 0.05148s^3 + 0.03418s^2 + 0.0009529s} \quad (95)$$

2.2.4 Modelo y simulación del sistema en lazo cerrado

Previo al diseño del controlador se modeló todo el sistema en lazo cerrado y se observó su comportamiento para reconocer así que se debía cambiar en su comportamiento mediante la implementación del controlador, el diagrama de bloques que representa el lazo cerrado se presenta en la figura 35:

Figura 35. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado



La figura 36 muestra el diagrama de bloques utilizado en Simulink para simular el comportamiento del sistema al cerrar el lazo de control. Inicialmente se utiliza un comparador de las tensiones de referencia y de salida del sensor, luego se utilizó un sistema convertidor de tensión a corriente representado por los dos primeros bloques funcionales del camino directo, el primero representa la relación entre las dos variables y la saturación para mantener los niveles de corriente dentro de los límites establecidos para la válvula y por último se tiene la función de transferencia del sistema:

Como respuesta ante una entrada escalón unitario, en esta simulación se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 37, donde se observó que el sistema tiene una

respuesta no acotada, lo cual corresponde a la realidad, porque sin control el cilindro salía siempre hasta su máxima extensión.

Figura 36. Diagrama de bloques usado para simular el comportamiento

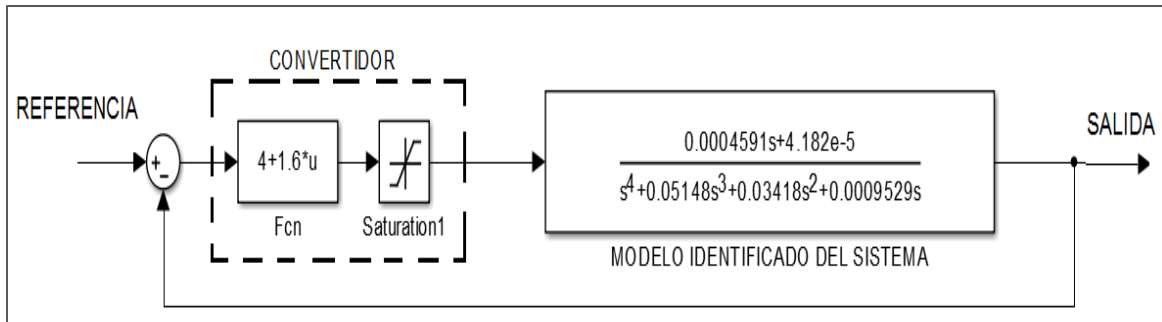
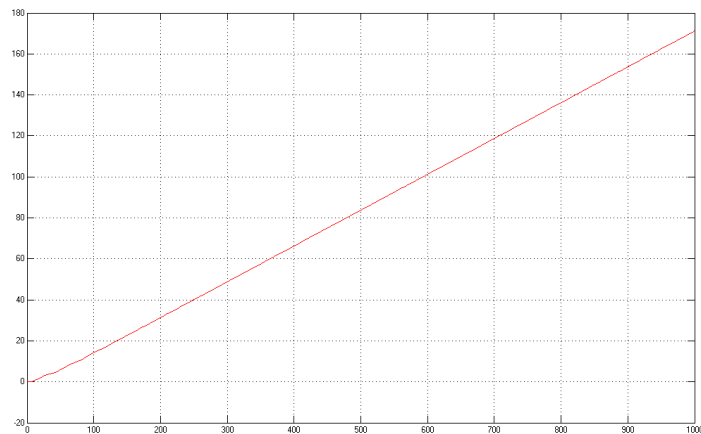


Figura 37. Respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario



3 DISEÑO DEL CONTROLADOR

3.1 TÉCNICAS DE DISEÑO DE CONTROLADORES

El diseño de controladores de acuerdo a Kuo(1995) ^[18], involucra tres etapas a saber:

1. Definir especificaciones de comportamiento del sistema:

La definición de especificaciones está relacionada con el comportamiento del sistema en criterios tales como respuesta transitoria (tiempo de asentamiento, tiempo pico, sobrepaso máximo, error en estado estacionario, estabilidad, respuesta en frecuencia.

2. Determinar la configuración del controlador en cuanto a su conexión con el proceso.

La configuración del controlador de acuerdo a su ubicación modifica el comportamiento del sistema, basándose en el control clásico, la implementación del controlador genera una función de transferencia distinta de acuerdo a su lugar en el lazo de control. Las configuraciones utilizadas pueden ser: en cascada ó en realimentación.

3. Determinar los valores de los parámetros del controlador para alcanzar los objetivos propuestos

Previo a esta etapa se debe definir el tipo de acción de control que se necesita para alcanzar los objetivos, es decir, definir si se utiliza control de dos posiciones, proporcional, integral, derivativo, etc. Luego entonces si se deben definir los parámetros para el controlador seleccionado.

Tomando en cuenta lo anterior, se describirán brevemente algunas técnicas del diseño de controladores.

3.1.1 Técnica del lugar geométrico de las raíces

De acuerdo a lo descrito por Ogata (1997)^[22], esta técnica consiste en observar el cambio del comportamiento de un sistema cuando varían los parámetros del mismo, en general, se utiliza como parámetro variable la ganancia del sistema y se observa como varían los polos del sistema cuando este parámetro varía entre cero e infinito.

La técnica permite entonces fijar los parámetros del controlador de acuerdo a los criterios deseados de comportamiento del sistema, igualmente permite apreciar la modificación del comportamiento del sistema cuando se agregan ceros o polos en la función de transferencia de lazo cerrado del sistema.

Cuando el controlador tiene dos parámetros variantes como es el caso de los controladores PD, PI ó tiene tres parámetros variables como el control PID, generalmente se fija uno de los parámetros y se varía uno solo (ganancia) para poder encontrar el comportamiento deseado, en caso de que no se consiga este comportamiento se varían los parámetros previamente fijados y se vuelve a analizar el comportamiento del sistema para observar si cumple con los criterios de diseño fijados. Más adelante se analizará el uso de la técnica para el controlador seleccionado en el proyecto.

3.1.2 Técnicas de diseño en frecuencia

Estas técnicas también se encuentran descritas por Ogata (1997)^[22], y ellas permiten el diseño del controlador partiendo del análisis que se hace sobre el sistema en el dominio de la frecuencia, es decir, cuando se evalúa el sistema tomando como entrada una onda sinusoidal que varía su frecuencia, lo cual permite determinar algunos aspectos como la frecuencia y el pico de resonancia, así como el ancho de banda y los márgenes de fase y ganancia del sistema.

Una de las técnicas que se usa en frecuencia es usando el diagrama de Bode, para este diseño se utiliza un primer ajuste de la ganancia del sistema en lazo abierto y se calculan gráfica o analíticamente los márgenes de ganancia y de fase del sistema sin controlador, es decir, se evalúa la estabilidad relativa del sistema y se utiliza el controlador para ajustar estos dos parámetros. Posteriormente se

realizan los ajustes necesarios para alcanzar el comportamiento deseado del sistema.

La técnica de la frecuencia es una mirada indirecta al análisis en el tiempo, debido a que los parámetros de este análisis están relacionados con los criterios de comportamiento en el tiempo, es por esta razón que las técnicas más utilizadas son las del análisis en el tiempo, como es la técnica del lugar geométrico de las raíces.

3.2 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

La sintonización de controladores es la determinación de los parámetros del controlador que permitan obtener la salida deseada del sistema, este ajuste de parámetros se puede hacer utilizando técnicas como las anteriormente descritas cuando se tenga un modelo exacto del sistema o utilizando métodos experimentales cuando el modelo exacto del sistema no se puede obtener, generalmente los controladores se sintonizan en la puesta en marcha del sistema y se realiza “in situ”, también es necesaria una sintonización del sistema cuando se observa un cambio severo en el comportamiento del sistema, esto conlleva también al término autosintonizable, es decir, el controlador está en capacidad de recalcular los parámetros de funcionamiento en caso de ser necesario.

Existen varios métodos de sintonización de acuerdo al sistema y los datos que se tienen del mismo, estos métodos pueden dividirse en dos:

- Métodos en lazo cerrado: donde la información de las características de comportamiento y por consiguiente de sintonización se obtienen partiendo de una prueba en lazo cerrado con un control únicamente proporcional actuando sobre el sistema como se muestra en la figura 38.
- Métodos en lazo abierto: Las características en este caso se obtiene del ensayo en lazo abierto de la planta (elemento final de control, proceso y sensor) tal como se muestra en la figura 39.

Figura 38. Método de sintonización de lazo cerrado

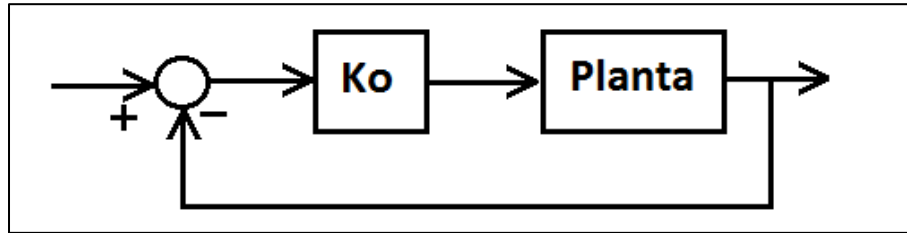


Figura 39. Método de sintonización en lazo abierto



3.2.1 Método de Ziegler y Nichols

Ziegler y Nichols (Ogata,1998)^[22] desarrollaron dos métodos para la sintonización de controladores basándose en la respuesta del sistema ante entradas de tipo escalón en lazo abierto y lazo cerrado proporcionando un sobrepaso máximo del veinticinco por ciento (25%). Estos métodos están limitados a sistemas que no contienen integradores en su modelo.

3.2.1.1 Método de lazo abierto

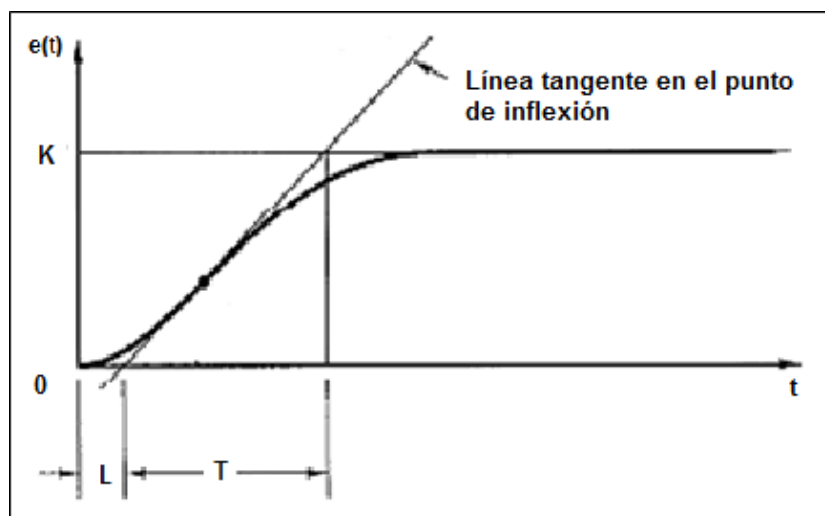
En este método se utiliza una entrada escalón a la planta y se obtiene la respuesta del sistema, la cual debe ser una curva en forma de S como la que se muestra en la figura 40.

En la curva se observan los parámetros importantes del comportamiento:

T: constante de tiempo

L: tiempo de retardo

Figura 40. Curva de comportamiento tipo S



Fuente: OGATA K, (1998) ^[22]

Obtenido esta curva se aproxima a un sistema de primer orden de la forma:

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts+1} \quad (96)$$

Con el sistema expresado de esta forma, se sintoniza el controlador de acuerdo a la tabla 11:

Tabla 11. Sintonización de parámetros método de Ziegler-Nichols en lazo abierto

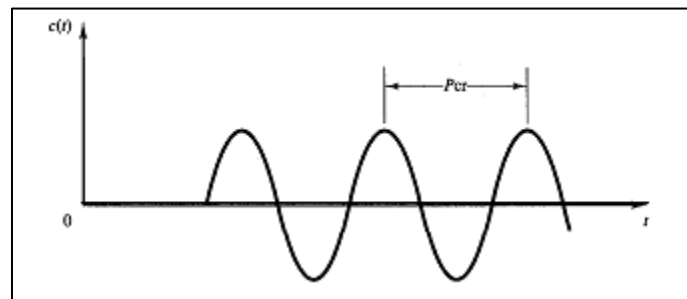
CONTROLADOR $G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$	K_P	T_i	T_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	∞	0
PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$\frac{L}{0.5}$	$\frac{L}{2}$

Fuente: OGATA K, (1998) ^[22]

3.2.1.2 Método de lazo cerrado

En este segundo método, se utiliza un control puramente proporcional en serie con el sistema y se modifica la constante de proporcionalidad hasta obtener oscilaciones sostenidas, esto ocurre cuando el sistema llega a ser marginalmente estable, en la figura 41 se muestra el comportamiento del sistema cuando ocurren oscilaciones sostenidas y su periodo crítico.

Figura 41. Oscilaciones sostenidas



Fuente: OGATA K, (1998) ^[22]

Este análisis genera una ganancia crítica y un periodo de oscilación crítica, con base en estos dos parámetros se sintonizan los coeficientes del controlador de acuerdo a la tabla 12.

Tabla 12. Sintonización de parámetros método de Ziegler-Nichols de lazo cerrado

CONTROLADOR $G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$	K_P	T_i	T_D
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: OGATA K, (1998) ^[22]

3.2.1.3 Método de Tyreus-Luyben

Este método parte de la misma prueba del método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols, (SHAHROKHI M, ZOMORRODI A, 2013)^[34] cambiando la forma en que se calculan los parámetros del controlador y basado en una ganancia última y un periodo de oscilación último, para este método solo se utilizan controladores PI y PID, los parámetros del controlador se calculan de acuerdo a la tabla 13.

Tabla 13. Sintonización de parámetros método de Tyreus-Luyben

CONTROLADOR $G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$	K_P	T_i	T_D
PI	$K_{cu}/3.2$	$\frac{1}{0.45} P_u$	0
PID	$K_{cu}/2.2$	$\frac{1}{0.45} P_u$	$\frac{1}{6.3} P_u$

Fuente: SHAHROKHI M, ZOMORRODI A, (2013)^[34]

3.2.1.4 Método CHR

Este método presenta una modificación al método de Ziegler-Nichols en lazo abierto, Chien, Hrones and Reswch (SHAHROKHI M, ZOMORRODI A, 2013)^[34], proponen una respuesta con sobrepaso del 20% y otra sin sobrepaso, el método distingue la sintonización para la respuesta a las perturbaciones o sintonización para respuesta al cambio de la referencia, el sistema se convierte en uno de primer orden con retardo y los parámetros de control se ven las tablas 14 y 15.

Tabla 14. Sintonización de parámetros método CHR 1

RESPUESTA A PERTURBACIONES						
SOBREPASO	0%			20%		
CONTROLADOR	K_P	T_i	T_D	K_P	T_i	T_D
P	$\frac{0.3}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	∞	0	$\frac{0.7}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	∞	0
PI	$\frac{0.6}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$4L$	0	$\frac{0.7}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$2.3L$	0
PID	$\frac{0.95}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$2.4L$	$0.42L$	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$2L$	$0.42L$

Fuente: SHAHROKHI M, ZOMORRODI A, 2013^[34]

Tabla 15. Sintonización de parámetros método CHR 2

RESPUESTA A CAMBIO DE REFERENCIA						
SOBREPASO	0%			20%		
CONTROLADOR	K_P	T_i	T_D	K_P	T_i	T_D
P	$\frac{0.3}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	∞	0	$\frac{0.7}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	∞	0
PI	$\frac{0.35}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$1.2T$	0	$\frac{0.6}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	T	0
PID	$\frac{0.6}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	T	$0.5L$	$\frac{0.95}{K} \left(\frac{T}{L} \right)$	$1.4T$	$0.47L$

Fuente: SHAHROKHI M, ZOMORRODI A, 2013 ^[34]

3.2.1.5 Sintonización de controladores usando MATLAB

La herramienta computacional de Matlab, presenta dos herramientas para la sintonización de parámetros, una de ellas llamada “SISOTOOL” y el simulador “Simulink” también cuenta con un bloque que permite realizar la sintonización del controlador.

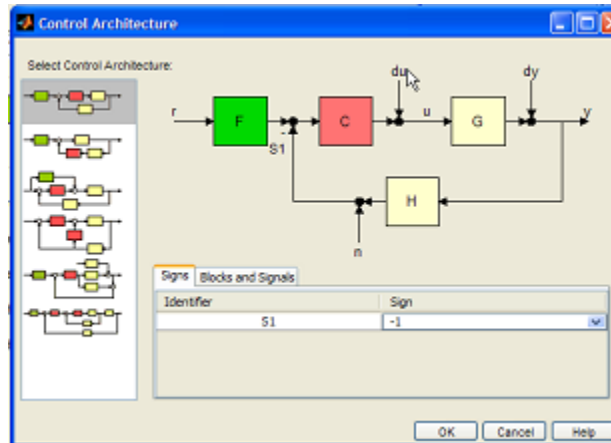
La primera herramienta de la parte de diseño de sistemas de control de Matlab, permite obtener los parámetros de sintonización del controlador para sistemas de una entrada y una salida, partiendo del conocimiento de la función de transferencia de la planta, la herramienta permite configurar distintas arquitecturas de control como se muestra en la figura 42.

Con la arquitectura seleccionada y definida la función de transferencia de la planta, la aplicación permite realizar la sintonización del controlador gráficamente usando métodos de análisis en frecuencia ó usando el lugar geométrico de las raíces.

La herramienta permite entonces definir los criterios de comportamiento deseados del sistema, así como el tipo de controlador, definiendo la ubicación de ceros, polos e integradores en la función de transferencia del controlador.

La herramienta también permite obtener una optimización del controlador sintonizado para mejorar el comportamiento del sistema de acuerdo a los requerimientos de diseño que se tengan.

Figura 42. Configuración de arquitectura de control usando SISOTOOL



Fuente: LAZAROS M (2012) ^[19]

La otra herramienta de sintonización parte del simulador de Matlab, el cual cuenta con el bloque de control PID, que debe ser ubicado inicialmente en el lazo de control en la posición deseada. Luego de ser ubicado en el sistema de control el bloque permite realizar una configuración inicial con los parámetros del controlador y el tipo de control a utilizar.

Luego del ajuste inicial el bloque permite realizar ajustes del controlador de forma gráfica, permitiendo obtener así la respuesta deseada del sistema.

3.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR DE POSICIÓN

Para el diseño del controlador se siguieron las etapas descritas al principio de este capítulo, a continuación se expondrá cada una de ellas.

3.3.1 Definición de los requerimientos del sistema

Los requerimientos de funcionamiento del sistema fueron definidos de una forma sencilla, se plantearon dos especificaciones básicas que fueron:

- El cilindro debería alcanzar la posición seleccionada por el usuario en el menor tiempo posible y conservarla aunque se presentaran perturbaciones que afecten su comportamiento, es decir, el error en estado estacionario del sistema debe ser nulo, para una entrada de referencia que puede variar de acuerdo al usuario.
- También, se decidió usar una presión de trabajo de 7 bar, tomando en cuenta las recomendaciones dadas para el cilindro utilizado y las presiones normales de los sistemas neumáticos que en general suelen manejar valores entre 5 y 10 bar, de igual forma se limitó la corriente de entrada a la válvula entre 11,3 mA y 13 mA, rango en el cual se presenta mayor linealidad en el funcionamiento de la misma.
- Como se definió en el anteproyecto, el controlador utilizado fue el S7-1200 y se utilizaron sus opciones de objetos tecnológicos, especialmente el bloque PID-compact, se tomó la decisión de usar este controlador digital por ser un sistema que se adecúa a cualquier condición de trabajo, con un lenguaje de programación realmente sencillo y cuyas funciones pre programadas son pertinentes con el desarrollo del proyecto.

Se seleccionó igualmente este controlador digital, por su velocidad de proceso y su alta resolución. También se debe aclarar que a pesar de manejar entradas y salidas analógicas, toda su operación es digital, para esto, el sistema realiza la conversión de análogo a digital en 625 μ s y utiliza una palabra de datos en un rango entre -27648 y 27648, es decir, el sistema posee también una alta sensibilidad, lo cual permite utilizarlo como un controlador analógico a pesar de no serlo.

No se definieron requerimientos con respecto al funcionamiento en el tiempo en estado transitorio tales como tiempos de asentamiento, levantamiento, etc. Debido a que este tipo de requerimientos se utilizan en sistemas de segundo orden pero este no es el caso del sistema que se identificó previamente.

Igualmente no se definieron criterios en frecuencia, ya que como se dijo anteriormente estos criterios están indirectamente relacionados con los criterios de comportamiento transitorio del sistema.

3.3.2 Ubicación del controlador con respecto a la planta

La disposición del controlador con respecto a la planta se decidió hacerla en serie, es decir, controlador y planta se ubican en serie por la trayectoria de camino de directo del sistema de lazo cerrado. Ver figura 3.

Esta disposición se selecciona por varias razones, como son:

- Los sistemas en serie requieren menor cantidad de componentes que los controladores en paralelo o los reguladores en cascada.
- Como los criterios de diseño son sencillos, igualmente se debía considerar una disposición sencilla que permita obtener este comportamiento deseado del sistema.
- Las perturbaciones en el sistema no se tratarán de predecir antes de su ocurrencia por lo cual no es necesario sistemas en paralelo o en cascada, solo se desea que el sistema actúe ante ellas aunque lo haga luego de que ellas ocurren.
- La documentación de los reguladores PID utilizados en el autómata S7-1200 sugiere una disposición de este tipo. (SIEMENS, 2014) ^[30]

3.3.3 Selección de la acción de control

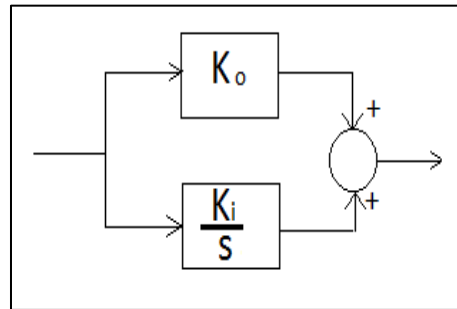
La acción de control depende del comportamiento deseado del sistema, es decir, para el caso del proyecto solo era necesario que el controlador permitiera obtener un error en estado estacionario nulo para una entrada escalón, se debe aclarar que el escalón puede cambiar su amplitud en cualquier instante dependiendo del usuario.

Para la selección de la acción de control se tomó en cuenta el hecho de que los tiempos representativos de la respuesta transitoria se pueden calcular para sistemas de segundo orden o sistemas que pueden ser llevados a esta formulación y como el sistema que se identificó no puede convertirse en un sistema de segundo orden por la ubicación cercana de sus polos, se seleccionó un

controlador con acción integral y proporcional PI, el cual garantiza un error en estado estacionario nulo para una entrada tipo escalón.

El controlador proporcional tiene una configuración como la mostrada en la figura 43 y la función de transferencia tiene la forma de la ecuación 96.

Figura 43. Controlador PI



Fuente: Adaptación de varios autores ^{[18][20][22]}

$$G_c = \frac{K_o(s+\alpha)}{s} \quad (97)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{K_o}{K_i} \quad (98)$$

3.3.4 Sintonización del controlador

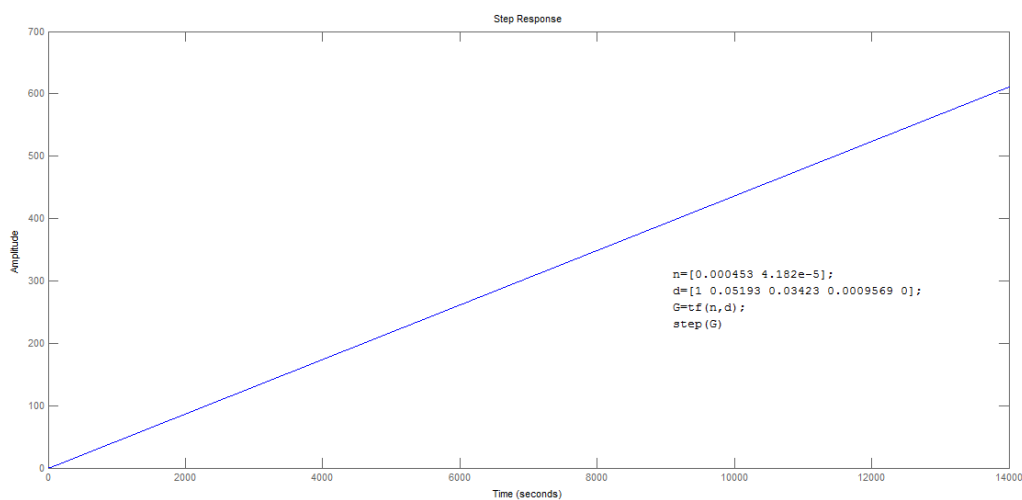
La estimación de los parámetros del controlador PI seleccionado, se realizó utilizando el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto de sintonización explicado anteriormente en el documento, usando el modelo identificado del sistema. La selección de este método se debió a que es un método práctico y el cuál ha sido comprobado en muchos trabajos de sintonización de controladores de forma acertada como un paso inicial en la sintonización definitiva.

No se realizó un diseño analítico del controlador debido a que los métodos utilizados para este tipo de diseño se han configurado para sistemas de orden inferior al sistema que se obtuvo (Kuo,B, 1995)^[18] en el proceso de identificación del sistema.

Para la selección del método se evaluó inicialmente el comportamiento del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón unitario, el resultado de esta primera aproximación se muestra en la figura 44 junto con el código usado en Matlab para su obtención

Como se puede observar, la curva del sistema no se asemeja a la curva mostrada en la figura 40, por esta razón se utilizó el método de lazo cerrado

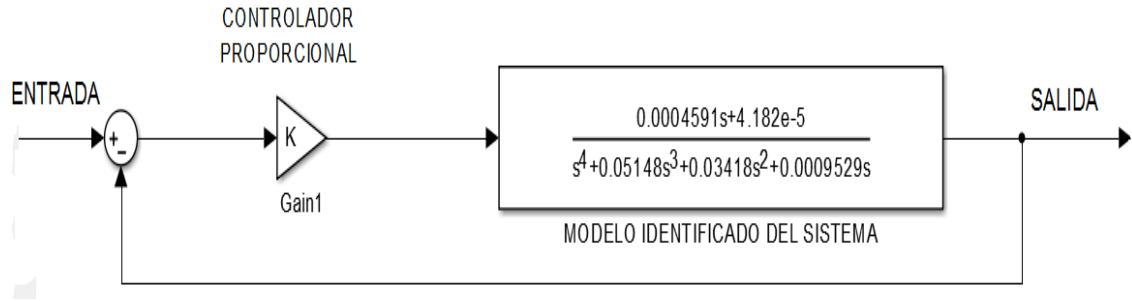
Figura 44. Comportamiento de la planta ante una entrada escalón unitario



3.3.4.1 Método de Ziegler-Nichols de lazo cerrado

El primer paso para la utilización del método es determinar si el sistema utilizando un control puramente proporcional puede presentar oscilaciones sostenidas, es decir, si el sistema puede ser marginalmente estable, para tal fin se concibió el diagrama de bloques mostrado en la figura 45.

Figura 45. Sistema de lazo cerrado utilizando un controlador proporcional



No se utiliza el convertidor de señal de tensión a corriente como se mostraba en la figura 36, porque el controlador cumplirá también esta función.

Para esta configuración del sistema la ecuación característica del sistema es:

$$s^4 + 0.05148s^3 + 0.03418s^2 + (0.0009529 + 0.0004591K)s + 4.182 \times 10^{-5}K = 0 \quad (99)$$

A esta ecuación característica se le aplicó el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz (Ogata, 1998)^[22] de tal forma que se pudiera determinar el valor de la variable K, que haga al sistema marginalmente estable, como se muestra a en la figura 46.

Figura 46. Arreglo de Routh-Hurwitz para analizar estabilidad

s^4	1	0.03418	$(4.182 \times 10^{-5}K)$
s^3	0.05148	$(0.0009529 + 0.0004591K)$	
s^2	b_0	b_2	
s^1	b_1		
s^0	c_0		

Aplicando las reglas para la construcción del arreglo de Routh-Hurwitz se obtuvieron los siguientes coeficientes:

$$b_0 = 1.58732 \times 10^{-2} - 8.7233 \times 10^{-3}K \quad (100)$$

$$b_2 = 4.182 \times 10^{-5}K \quad (101)$$

$$b_1 = \frac{1}{b_0} [-3.9516 \times 10^{-6}K^2 - 3.3601 \times 10^{-6}K + 1.5122 \times 10^{-5}] \quad (102)$$

$$c_0 = 4.182 \times 10^{-6}K \quad (103)$$

Para determinar el valor de la constante K crítica es necesario buscar la ocurrencia de estabilidad marginal, es decir, en el arreglo de Routh-Hurwitz los elementos de toda una fila deberían ser iguales a cero, en la tercera columna correspondiente a “s²” no se puede presentar, ya que para cualquier valor de la ganancia K positivo el segundo término (b₂) será diferente a cero, igual sucede con la última fila. En la única fila donde se pueden hacer cero todos los términos es en la tercera, es decir, se evalúo el sistema haciendo b₁ nulo.

$$b_1 = \frac{1}{b_0} [-3.9516 \times 10^{-6}K^2 - 3.3601 \times 10^{-6}K + 1.5122 \times 10^{-6}] = 0 \quad (104)$$

$$-3.9516 \times 10^{-6}K^2 - 3.3601 \times 10^{-6}K + 1.5122 \times 10^{-6} = 0 \quad (105)$$

Resolviendo la ecuación anterior se encontró que los valores de K que satisfacen la expresión son:

$$K=1.5191 \text{ ó } K=-2.5191 \quad (106)$$

Cómo K debe ser positivo el valor de la ganancia crítica es K_{cr} = 1.5191, Conocido el valor crítico de la ganancia, se reemplazó en la ecuación característica para encontrar la frecuencia de la oscilación y el periodo de la misma.

$$s^4 + 0.05148s^3 + 0.03418s^2 + 0.0016s + 0.000063529 = 0 \quad (107)$$

Solucionando la ecuación se obtuvo que dos de la raíces se encuentran ubicadas en

$$s \approx 0 \pm 0.1795j \quad (108)$$

La frecuencia de oscilación del sistema es entonces:

$$W_{cr} = 0.1795 \text{ s}^{-1} \quad (109)$$

Con esta frecuencia el periodo crítico es:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{w_{cr}} = \frac{2\pi}{0.1795} = 35.0038 \text{ s} \quad (110)$$

Con estos parámetros se calcularon los parámetros iniciales del controlador de acuerdo a la tabla 12, así:

$$Kp = 0.45 * K_{cr} = 0.683595 \quad (111)$$

$$T_i = \frac{1}{1.2} P_{cr} = 29.1698s \quad (112)$$

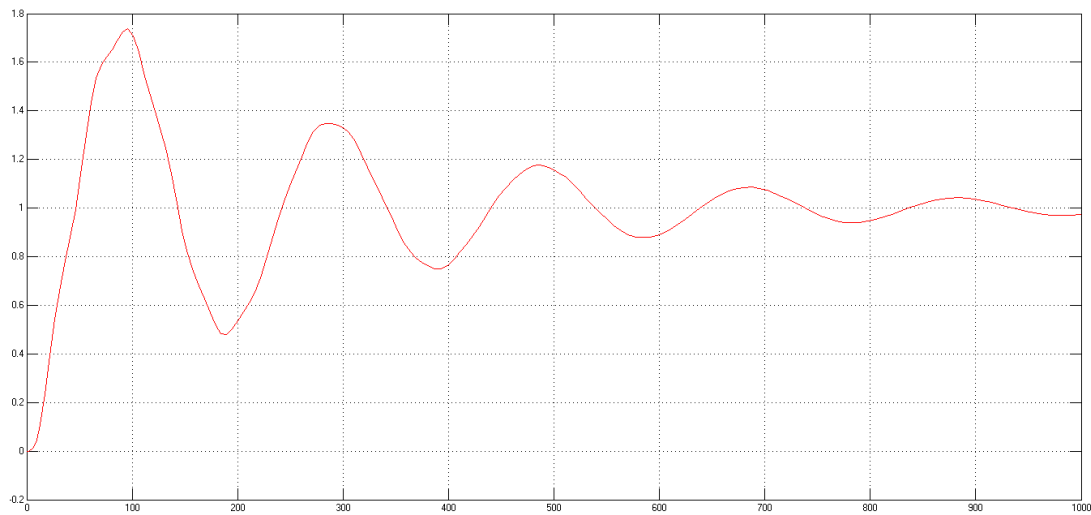
$$G_c = Kp \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = 0.683595 \left(1 + \frac{1}{29.1698s} \right) \quad (113)$$

El controlador entonces tiene la forma:

$$G_c = \left(\frac{0.683595s + 0.023435}{s} \right) \quad (114)$$

Con el controlador sintonizado con sus valores iniciales, se realiza una simulación para observar su comportamiento, cuyo resultado se observa en la figura 47, con el controlador y su sintonización inicial se alcanzó la estabilidad y el error en estado estacionario nulo que se buscaba, aunque el tiempo de asentamiento del sistema es considerable y se presenta una respuesta transitoria que pudo ser mejorada.

Figura 47. Comportamiento del sistema controlado obtenido en la simulación

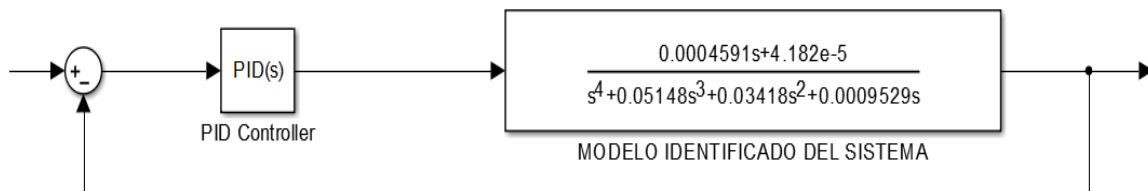


Con los parámetros ya encontrados del controlador, se realizó una optimización de los mismos utilizando Matlab.

3.3.4.2 Optimización de los parámetros del controlador usando Matlab

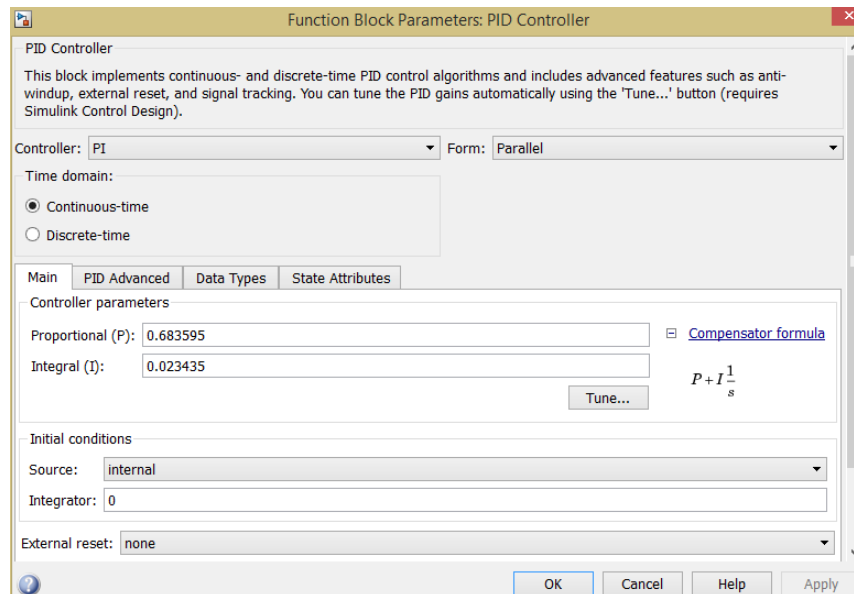
Para esta optimización se utiliza el simulador “Simulink” de Matlab y su bloque de control PID, inicialmente se debe construir el diagrama de bloques incluyendo el bloque dentro del lazo de control como se observa en la figura 48

Figura 48. Diagrama de bloques usando el controlador PID



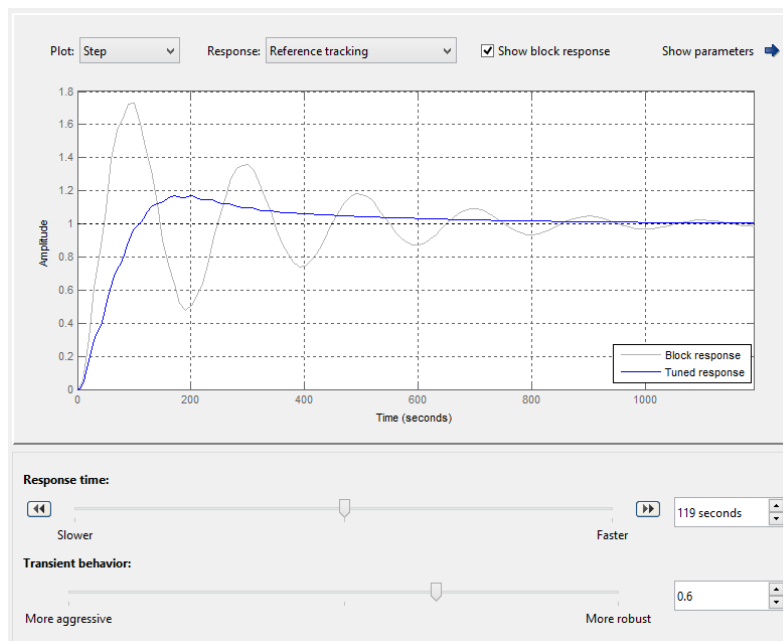
Accediendo al bloque se puede decidir que tipo de acción de control ejecutar y los valores iniciales para la sintonización, en este caso, los calculados anteriormente, como se ve en la figura 49.

Figura 49. Configuración inicial del bloque en Simulink



Seguidamente se procedió a la sintonización del controlador, haciendo clic en el boton “Tune”, lo cuál generó el cuadro de diálogo mostrado en la figura 50.

Figura 50. Sintonización del controlador



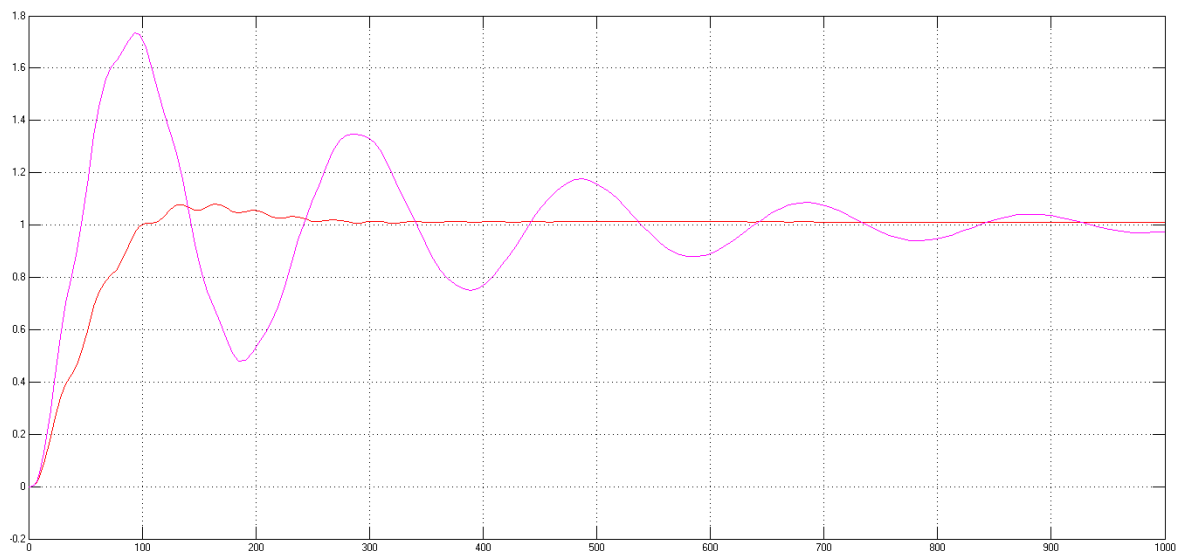
En la figura 50 se observan las curvas de respuesta ante una entrada escalón del sistema con el controlador calculador anteriormente en color gris y la curva del controlador optimizado en color azul, igualmente presenta las opciones de mejorar la velocidad de respuesta y la respuesta transitoria del sistema.

Como producto de esta optimización se obtuvo la siguiente configuración del controlador

$$G_c = \left(\frac{0.54657s + 0.00019322}{s} \right) \quad (115)$$

En la figura 51 se muestra la comparación de la respuesta con el sistema calculado teóricamente (línea magenta) y el sistema optimizado (línea roja) de forma más clara.

Figura 51. Comparación de la respuesta del sistema



Con este controlador optimizado se realizó la sintonización final se realizó “in situ”, buscando mejorar la respuesta del sistema.

4 IMPLEMENTACIÓN Y SINTONIZACIÓN FINAL DEL SISTEMA

En la etapa definitiva del proyecto, se implementó el sistema en el autómatas programable S7-1200, y la programación del controlador se desarrolló usando el software Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal V.11).

4.1 USO DEL BLOQUE PID COMPACT EN TIA PORTAL

En el entorno de programación del TIA Portal se distinguen tres tipos de bloques lógicos que permiten el desarrollo de un proyecto (Siemens, 2014)^[30], estos son:

- Bloques de organización (OB): Son bloques que permiten ordenar el programa sirviendo de interfaz en el sistema operativo y el programa del usuario [fuente]
- Función (FC): Son bloques lógicos que se usan para desarrollar subrutinas específicas dentro de un programa.
- Bloques de función (FB): Son bloques que permiten desarrollar subrutinas a las cuales está asociado un bloque de datos que son transferidos desde otro bloque lógico.

Dentro de los bloques de función se encuentra el bloque PID Compact, el cual presenta un regulador PID el cual puede configurarse dependiendo de la variable que se quiere regular y de los criterios de comportamiento deseado del sistema, e igualmente permite la opción de autosintonizarse. El bloque se puede observar en la figura 52.

Este bloque debe configurarse como un “Interruptor de ciclo”, es decir, el bloque interrumpe la rutina principal para ejecutar su función cada determinado tiempo, es decir, cada cierto tiempo compara la salida del sistema físico (entrada del controlador) con el valor de referencia (Setpoint del controlador) y genera una señal de control hacia el sistema, en este caso se seleccionó un tiempo de 500 ms para cada interrupción.

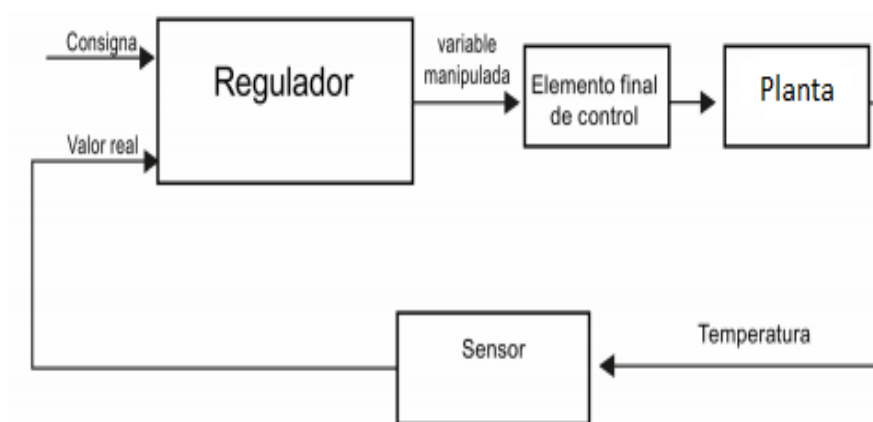
Figura 52. Bloque PID_Compact



Fuente: SIEMENS (2014) ^[30]

Este bloque de función actúa como un controlador en serie como se muestra en la figura 53.

Figura 53. Lazo de regulación

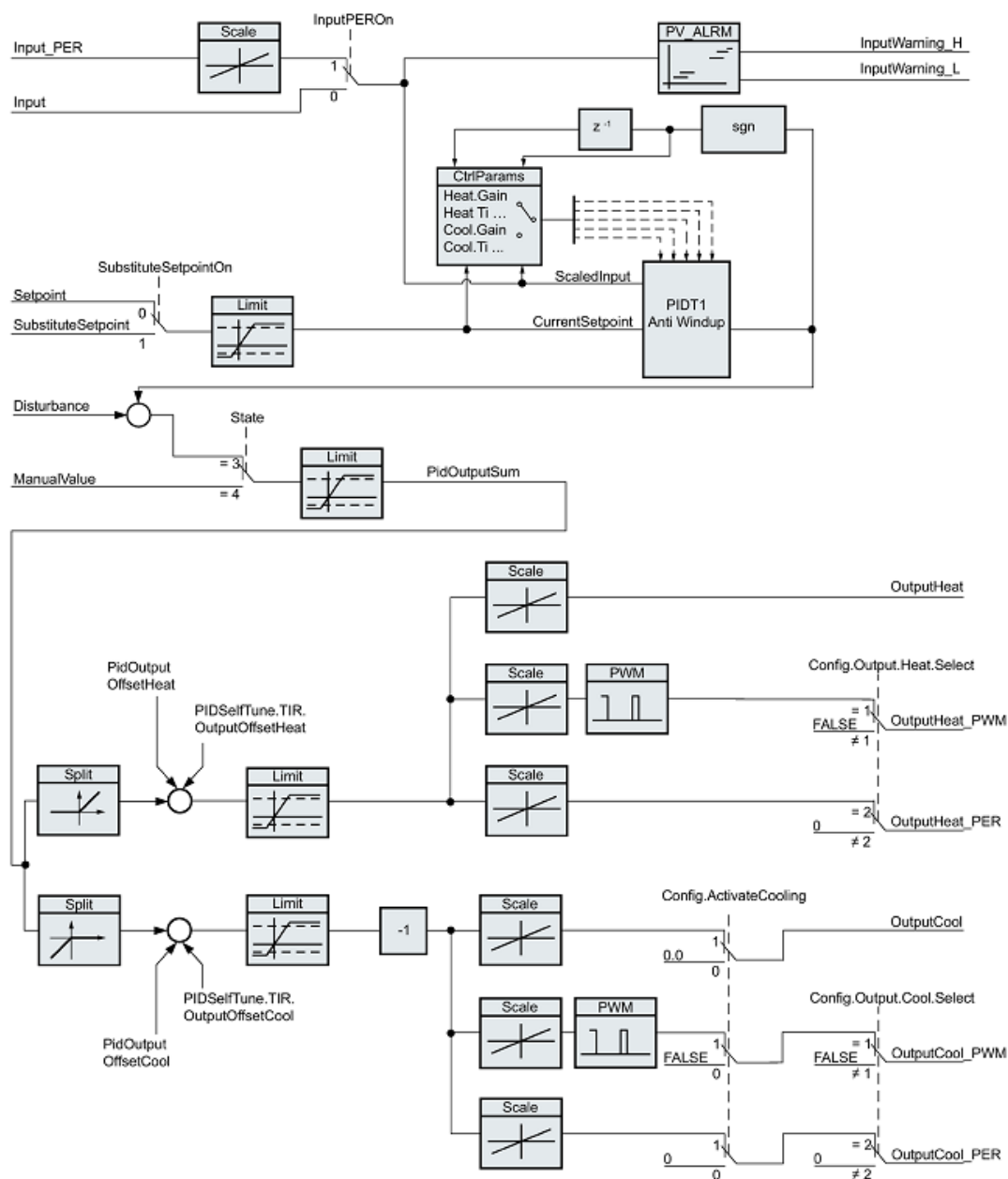


Fuente: Adaptación de SIEMENS (2014) ^[22]

La figura 54 muestra el algoritmo del control PID, en la cual se encuentran una serie de swtich virtuales que permiten la selección de la configuración deseada

para el regulador PID, por medio de estos switch se activan o desactivan características del sistema como son la entrada analógica ó entrada del proceso, entrada manual ó no de los parámetros del controlador, salida periférica ó salida al proceso.

Figura 54. Algoritmo PID



Fuente: SIEMENS (2014) ^[30]

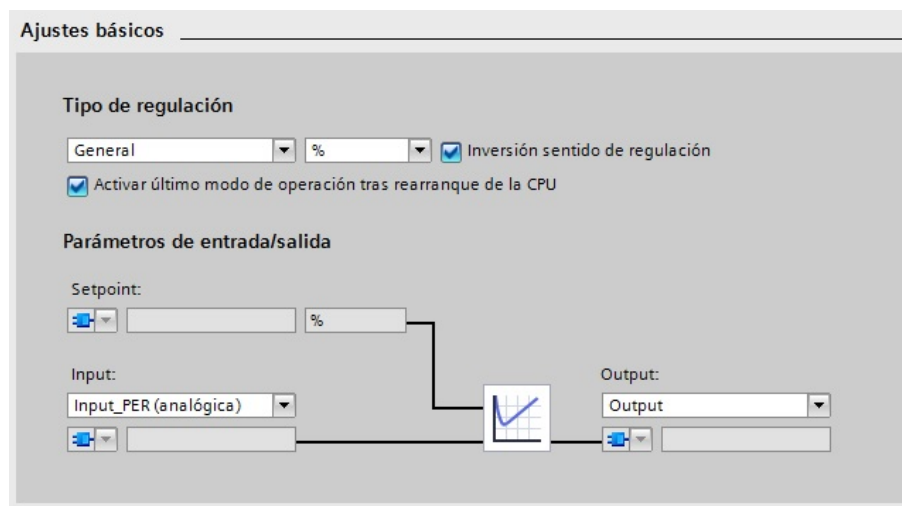
La conmutación de cualquiera de los switch virtuales que se presentan en el algoritmo del bloque PID, genera una comunicación entre distintos puntos de memoria del PLC, permitiendo así tener distintas funciones de comunicación a través del mismo bloque.

4.1.1 Configuración inicial del bloque

Inicialmente se debe crear un bloque de interrupción de ciclo, y sobre este bloque ubicar el objeto tecnológico PID_compact, para comenzar a configurar el mismo.

Para configurar inicialmente el bloque de función del PID, se seleccionó una regulación general, es decir, no se especificó la variable que se deseaba controlar, igualmente se seleccionó una entrada periférica, es decir, la entrada se tomaba directamente del sensor. La salida se configuró como una salida al sistema, para de esta forma poderla escalar entre los valores seleccionados de corriente. Este primer ajuste se muestra en la figura 55.

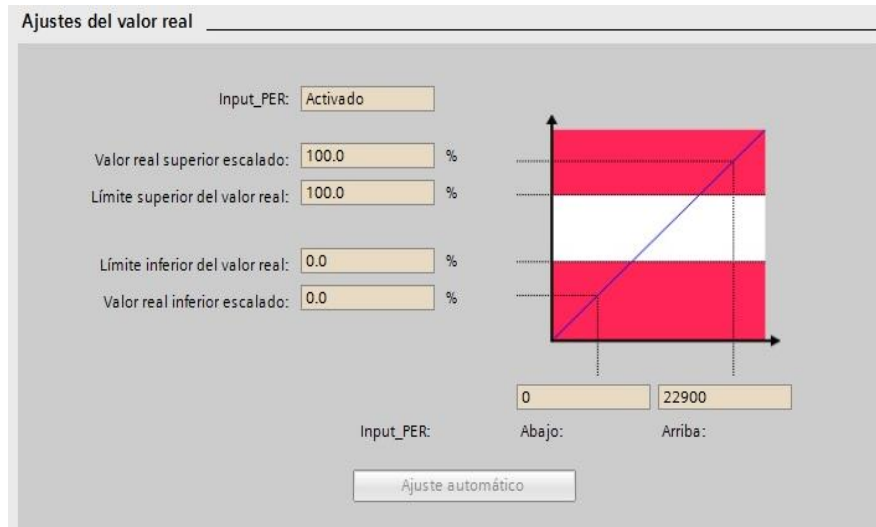
Figura 55. Ajustes iniciales del bloque PID 1



Luego de esta selección inicial el paso siguiente fue el escalado de la señal de entrada, en este caso se realizó el escalado tomando en cuenta los puntos máximo y mínimo del recorrido del cilindro, es decir, se leyó a que valores de memoria correspondían el 0% del recorrido y el 100% del mismo, en este momento se presentó un problema con la medida, debido a que por la sensibilidad del potenciómetro y la alta resolución del PLC hacían que no fuera estable el valor

de entrada, se seleccionó entonces el valor promedio, la configuración se muestra en la figura 56.

Figura 56. Configuración inicial bloque PID 2



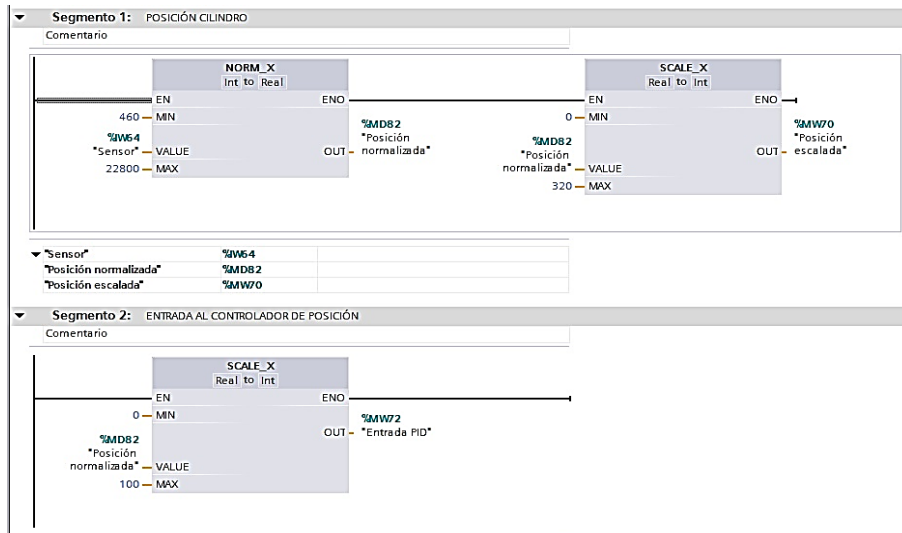
Como paso final para el ajuste inicial del bloque, se debían especificar los parámetros del controlador de forma manual y seleccionar el tipo de regulador a utilizar. Se utilizaron como parámetros iniciales los encontrados anteriormente luego de la sintonización, como se muestra en la figura 57.

En la figura 58 se muestra el bloque luego de haber sido configurado con sus parámetros iniciales y sus entradas y salidas.

4.2 ESTRUCTURA DE CONTROL

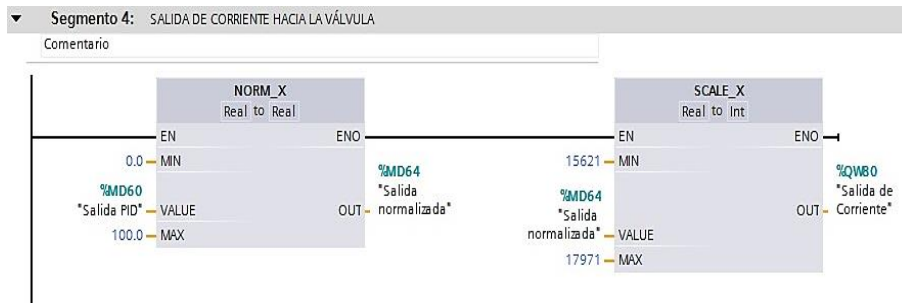
Con el bloque PID configurado dentro del bloque de interrupción de ciclo se creó entonces la demás estructura de control, inicialmente se hizo necesario normalizar y escalar la posición como se muestra en la figura 59, para ser presentada en el sistema SCADA y para que funcione como entrada al regulador PID en caso de no se quiera utilizar la entrada periférica directamente.

Figura 59. Normalizado y escalado de la posición



También se debió escalar y normalizar la salida del PID para que las corrientes de la válvula estuvieran en el rango de 11.3 a 13 mA, lo cual se observa en la figura 60.

Figura 60. Adecuación de la corriente de salida



En la siguiente línea de control se normalizó y escaló la consigna para que pudiera ser reconocida por el regulador PID, tal como se observa en la figura 61.

Igualmente para poder visualizar la salida de corriente hacia la válvula se debía tomar la salida de corriente para poder ser normalizada y escalada, de tal forma que se pudiera mostrar en el sistema SCADA, lo cual se observa en la figura 62.

Figura 61. Normalizado y escalado de la consigna

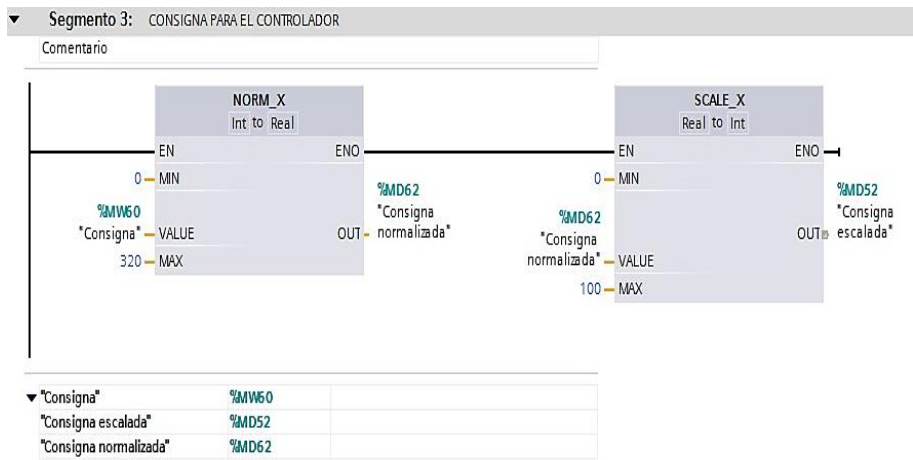
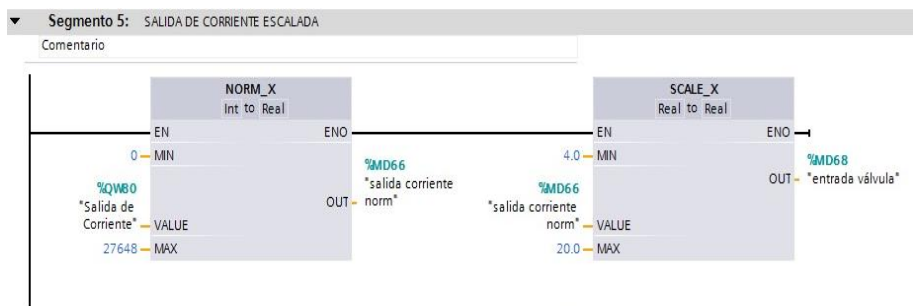


Figura 62. Normalizado y escalado de la corriente para visualización

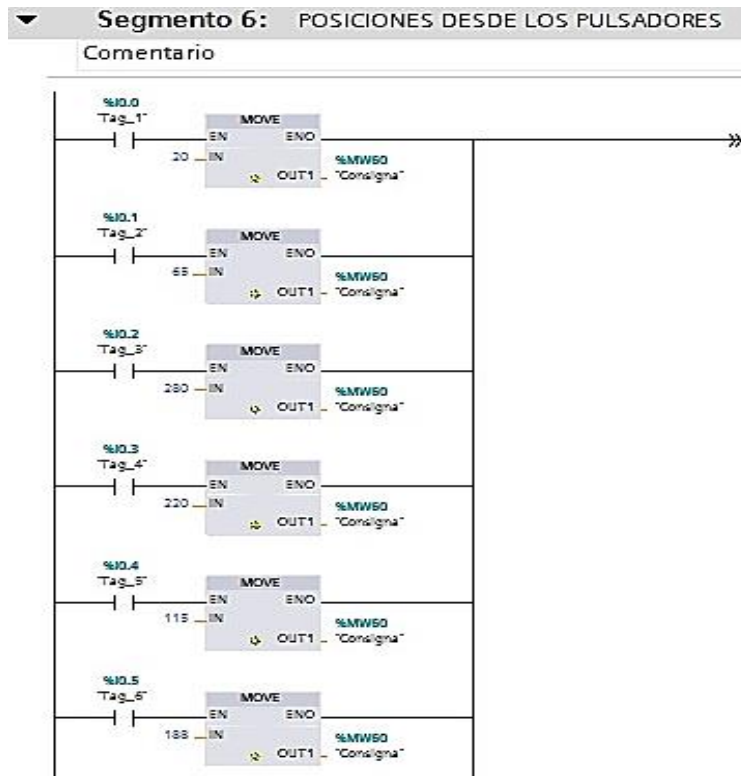


Como una alternativa de seleccionar la consigna se pueden utilizar las entradas digitales del sistema, a cada una de las cuales se le asignó un valor aleatorio para la consigna como se observa en la figura 63.

4.3 AUTOSINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR

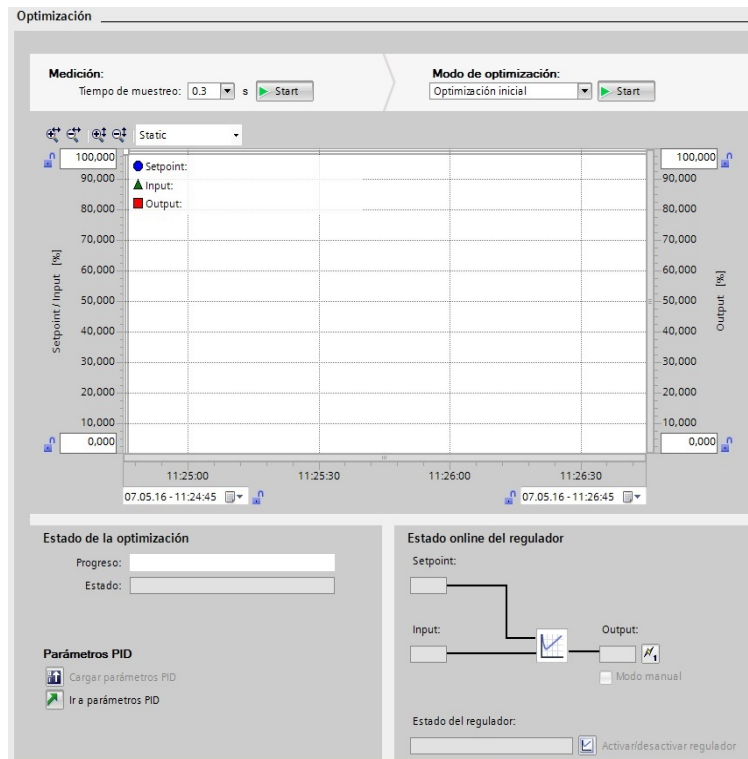
La etapa final en el desarrollo del proyecto fue la sintonización “in situ” del controlador, para realizarlo, se accede al botón de puesta en servicio del bloque PID_compact con lo cual se abre la pantalla mostrada en la figura 64.

Figura 63.Configuración de la consigna usando entradas analógicas



En ella se puede seleccionar el tipo de optimización, es decir, si es la optimización inicial del sistema o una sintonización fina alrededor del punto de consigna, también se puede observar el progreso de la optimización y seleccionar entradas manuales, entonces conocido lo anterior se procedió a comenzar la optimización inicial, en este proceso el sistema genera una serie de pulsos que envía al sistema buscando que la consigna y la entrada del regulador sean iguales, este proceso fue lento debido a que los parámetros del regulador no se obtuvieron por un método matemático exacto, sino que fue sintonizado por métodos empíricos como se explicó anteriormente.

Figura 64. Ventana de puesta en servicio bloque PID_compact



Cuando el sistema estuvo cerca de la condición ideal, es decir, consigna y entrada muy cercanas, se comenzó un proceso de optimización fina como el mostrado en la figura 65. En ella se observa la línea azul que representa la consigna, la línea verde que representa la posición real del cilindro y la línea roja que muestra la entrada de corriente de la válvula.

Luego de este proceso de sintonización se cargan los parámetros al controlador y como resultado se obtuvieron los parámetros del controlador mostrados en la figura 66, como se observa en ella, los parámetros difieren de los obtenidos analíticamente y con la optimización usando Matlab, esto, en razón a que el modelo utilizado solo tuvo en cuenta una forma de entrada al sistema.

Figura 65. Sintonización fina del regulador

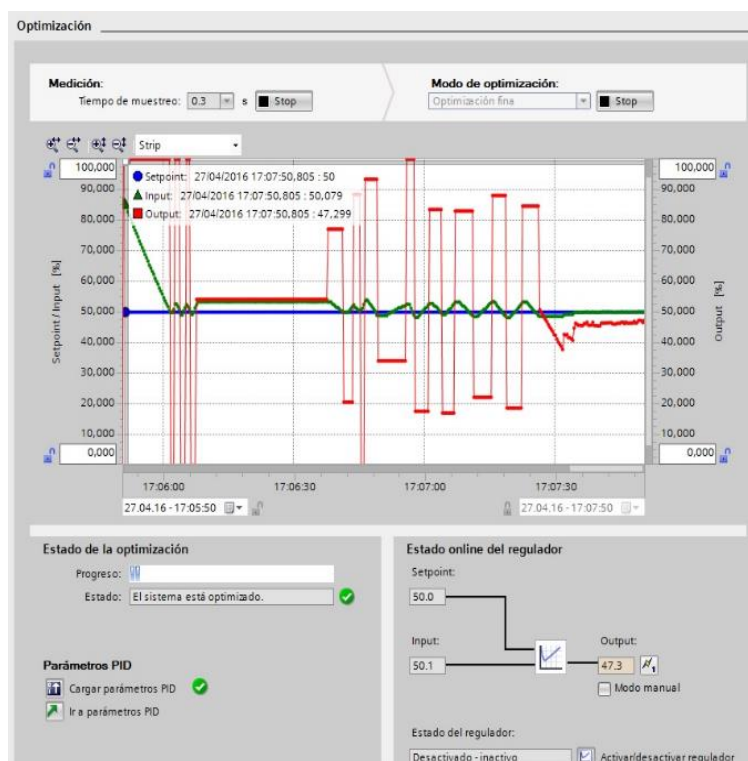


Figura 66. Parámetros sintonizados del regulador

Parámetros PID

☐ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 12.07068

Tiempo de integración: 4.565004 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 0.8

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 1.000001E-1 s

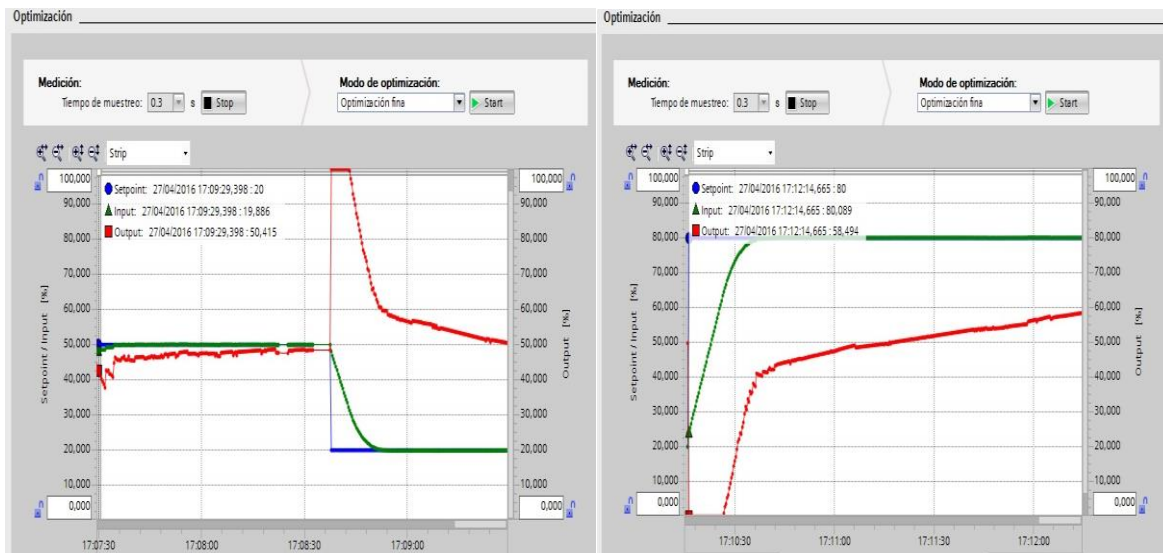
Regla para la optimización

Estructura del regulador: PI

Con los parámetros ya cargados en el regulador PID_compact, se probó su funcionamiento ante distintos valores de consignas como se muestra en la figura

67, igualmente se varió la presión de suministro y se generaron cambios forzados en la posición aplicando fuerza sobre el cilindro, ante lo cual el sistema mostraba cambios, pero luego de realizar el proceso de sintonización nuevamente se volvía a tener el funcionamiento deseado del sistema.

Figura 67. Comportamiento del sistema ante distintas consignas



En la figura 67, la línea azul representa el valor de la consigna deseada en porcentaje de la carrera del cilindro, la línea roja el valor de la corriente de entrada a la válvula y la línea verde la posición real del cilindro, la cual se ve como alcanza la consigna.

4.4 SISTEMA SCADA

Como punto final luego de tener un sistema de control desarrollado, se creó un sistema SCADA que permitiera monitorear el funcionamiento del cilindro, haciendo uso de la herramienta WinCC RT Advanced, el sistema SCADA se muestra en la siguiente figura.

A partir de este sistema se puede monitorear gráfica y numéricamente la posición del cilindro, también permite ingresar el valor de la posición que se desea de la corriente, y permite acceder a la ventana de puesta en servicio del bloque PID_compact. En la figura 68 se presenta el sistema SCADA desarrollado.

Figura 68. Sistema SCADA del sistema



5 CONCLUSIONES

Aunque el proyecto concluyó con un controlador totalmente funcional que cumplía con el criterio de diseño principal, debe generarse otro método para la identificación del sistema, permitiendo esto, que se obtenga un modelo más exacto del sistema en el que se tengan en cuenta otros factores importantes para su comportamiento y una sintonización previa más cercana a la real, en razón a que el modelo obtenido representa con gran exactitud solo una de las posibles situaciones de entradas al sistema.

La sintonización inicial de los parámetros del controlador permitió obtener una salida de posición que cumplía con el criterio de hacer el error en estado estacionario nulo, pero generaba un tiempo exagerado para lograrlo por lo cual se hizo necesario una sintonización “in situ” para mejorar esta característica. El uso del autómata programable SIEMENS S7-1200 y en especial el bloque de función PID_compact, facilitaron la implementación del regulador PI, para controlar la posición del cilindro, pero su sintonización cuando los parámetros del controlador se desconocen o la sintonización inicial difiere de la más óptima requiere demasiado tiempo, este tiempo puede verse disminuido acercando más el modelo teórico con la realidad del sistema a controlar.

El uso de herramientas computacionales para el cálculo y la simulación de los sistemas, así como para la identificación de los parámetros, reduce considerablemente los tiempos requeridos para el desarrollo, igualmente disminuye los costos evitando construcciones innecesarias para evaluar comportamientos de un sistema en particular, pero no se puede limitar el diseño al uso de ellas como única herramienta, ya que las labores de diseño van más allá de los cálculos al análisis de los resultados y el desarrollo de estrategias.

En el proceso de validación de la sintonización analítica del controlador se pudo concluir que los parámetros calculados debían ser mejorados para obtener así una mejor respuesta del sistema, con el proceso de autosintonización del sistema se pudo observar también que el sistema respondía de manera acertada ante los cambios en los parámetros del sistema, como fueron distintas condiciones de carga y cambios de presión en el sistema, por lo cual se puede concluir que el sistema permitirá un control de la posición adaptativo y que actuará de forma confiable.

El uso del sensor de posición utilizado generó dificultades para la sintonización del controlador “in situ” debido a que presentaba problemas de precisión y la buena resolución del autómata (12 bits) para las entradas analógicas, hacía que ante la misma posición del cilindro se obtuvieran distintos valores en el campo de memoria correspondiente a la entrada del mismo, estos problemas se trataron de solucionar realizando un escalado de los valores de entrada pero a pesar de ello se continuaron presentando diferencias en la posición del cilindro.

El modelo matemático que se obtuvo del sistema de forma analítica a pesar de mostrar el comportamiento del sistema de una forma muy aproximada, se dificulta su utilización para la sintonización del controlador, debido a que contiene muchos parámetros que son variantes en el tiempo como caso especial el módulo de Bulk, el cual cambia con la temperatura, lo cual hace difícil la aproximación por este método.

El proyecto permitirá en estudios posteriores contar con bases fuertes para desarrollar estrategias de control que permitan incorporar el cilindro neumático a procesos productivos en los cuales se haga necesario un control de posición confiable y que pueda adaptarse a los cambios de los parámetros del sistema controlado.

6 RECOMENDACIONES

Dentro de la línea de investigación de control enfocado en la neumática proporcional, pueden realizarse trabajos posteriores que conlleven a una determinación más exacta del modelo matemático del sistema que permita realizar diseños de controladores con mayor precisión.

Igualmente se puede realizar modificaciones al sistema de tal forma que se puedan generar perturbaciones al sistema de forma controlada y evaluar el comportamiento del sistema ante ellas más profundamente.

Las condiciones de presión y carga sobre el sistema pueden variarse para evaluar su comportamiento y las posibles modificaciones al actual proyecto.

Puede evaluarse el uso de sensores distintos al utilizado que permita mayor exactitud en la medida y disminuir la carga directa sobre el cilindro, como pueden ser sensores infrarrojos, ultrasónicos, etc.

Como paso siguiente se puede buscar el uso del sistema utilizado en este proyecto dentro de aplicaciones tales como celdas de manufactura como parte de un sistema de almacén inteligente que permita obtener piezas ubicadas en distintos niveles, manipuladores neumáticos que tengan trayectorias sencillas y en aplicaciones robóticas.

Es posible evaluarse el uso de las técnicas desarrolladas en el presente proyecto para otros cilindros neumáticos de distintos tamaños y prestaciones.

Es pertinente el estudio de métodos que permitan la evaluación de los parámetros de funcionamiento de un cilindro neumático en forma empírica.

En el desarrollo curricular de la Maestría en Sistemas Automáticos de Producción es recomendable hacer una profundización en la neumática proporcional.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARAHAL, Manuel, BERENGUEL S, Manuel, RODRIGUEZ D, Francisco, "Técnicas de Predicción con Aplicaciones en Ingeniería", Universidad de Sevilla, España, 2006
- [2] ARREGOCES CAMPOS, Sigilfredo, "Controladores de acción proporcional e integral PI", Notas de clase Universidad Tecnológica de Pereira, 2015
- [3] ÅSTRÖM, Karl J.; WITTENMARK, Björn. "Adaptive control". Courier Corporation, 2013.
- [4] BACCA, Germán A.; DE NEGRI, Víctor J.; ASSAF, Yesid. "Modelo Matemático No-Lineal para un Servosistema Neumático de Posicionamiento Preciso". Revista Tecno Lógicas, 2010, no 24, p. 11-37.
- [5] BURBANO J, Juan Carlos; BACCA B, Germán A. ; HOYOS M, Mario. "Control de Posicion y Presion para Manipulador Neumatico a traves de PC". Scientia et Technica, 2003, vol. 1, no 21.
- [6] CALDAS FLAUTERO, Oscar, et al. "Identificación paramétrica en lazo cerrado de sistema de accionamiento neumático para cilindro de doble efecto". Facultad de Ingeniería, 2012, vol. 21, no 33, p. 9-19.
- [7] CREUS SOLÉ, Antonio. "Instrumentación industrial". Marcombo, 2012.
- [8] DIETER, George E. "Engineering design". McGraw-Hill, 1991.
- [9] FESTO, "Condiciones de utilización, almacenamiento y transporte para los productos Festo", 2016
- [10] FESTO, "Cilindro neumático DNC-50-320-PPV-A", [Imagen] Disponible en: https://www.festo.com/cfp/camosHtml/i?SIG=8593e327a3d8ddce93509d5fb0b8f5c4bde3f5f_10a_190.jpg, 2016
- [11] FESTO, "Válvula proporcional MPYE-5-1/4-420-B." [Imagen] Disponible en: https://www.festo.com/cfp/camosHtml/i?SIG=ce3f142da211deee14cbdd95d4e358f3dee35b16_147_190.jpg, 2016
- [12] FESTO, "Unidad guía FENG- 50- 320-KF." [Imagen] Disponible en: https://www.festo.com/cfp/camosHtml/i?SIG=b44cd9a0ad93282642e1246680087fe6262723c3_10b_190.jpg, 2016.

[13] FESTO, “Unidad de mantenimiento LFR-1/4-D-MINI” [Imagen] Disponible en: https://www.festo.com/cfp/camosHtml/i?SIG=7dcfe479a90f8863eb17fdb5bfe82494f5886dbb_190_bd.jpg, 2016

[14] FESTO, “Sistema de medición MLO-POT-360-LWG” [Imagen] Disponible en: https://www.festo.com/cfp/camosHtml/i?SIG=f1b1aa9865ebd26e40530d9886f3a9ee8578d421_11c_190.jpg, 2016

[15] FESTO, “Válvulas posicionadoras MPYE” [Catálogo] Disponible en: https://www.festo.com/cat/es-co_co/data/doc_es/PDF/ES/MPYE_ES.PDF, 2016

[16] FIAC, “Compresor New silver D5,5/300” [Imagen] Disponible en: https://www.gmtinternational.nl/media/catalog/product/cache/1/small_image/400x/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/5/6/560703057_5.jpg, 2016

[17] FUENTES CHILLARÓN, Manuel A. “Modelado y control robusto de un cilindro neumático”. 2009.

[18] KUO, Benjamin C, “Sistemas de Control Automático”, Séptima Edición, México, Prentice Hall, 1995

[19] LAZAROS, Moysis, “The SISO Design Tool”, Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Sciences, Department of Mathematics, 2012

[20] LEWIS, Paul H, YANG, Chang. “Sistemas de Control en Ingeniería”, Inglaterra, Prentice Hall 2011.

[21] MATHWORKS, “Data Acquisition Toolbox™ Quick Reference Guide”, 2008

[22] OGATA, Katsuhiko, “Ingeniería de Control Moderna”, Tercera Edición, Pearson, México, 1997.

[23] PARR, E. A. “Programmable Controllers”. Tercera Edición. Newnes, Inglaterra, 2003.

[24] RAMIREZ NEYRA, Fernando G;. “Sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales”. 2010. Tesis Doctoral.

[25] RAOL, Jitendra R.; GIRIJA, Gopalrathnam; SINGH, Jatinder.” Modelling and parameter estimation of dynamic systems”. Iet, 2004.

[26] REINOSO, Oscar , RUBIO, Ernesto. “Identificación Y Control De Un Cilindro Neumático Con Válvulas Proporcionales”. España, Universidad Miguel Hernandez, 2003.

- [27] SANDOVAL RODRÍGUEZ, Camilo Leonardo; MEZA PEDROZO, Rodrigo. "Aplicación de un Sistema Robusto al Control de Posición de un Cilindro Neumático, expuesto a perturbaciones". INGE@ UAN-Tendencias en la Ingeniería, 2011, vol. 2, no 3.
- [28] SHAHROKHI, Mohammad; ZOMORRODI, Alireza. "Comparison of PID controller tuning methods". Department of Chemical & Petroleum Engineering Sharif University of Technology, 2013.
- [29] SIEMENS, "Simatic. S7 controlador Programable S7 1200, manual del sistema". 2009.
- [30] SIEMENS, "Simatic. S7-1200, S7-1500 Regulación PID manual de funciones". 2014.
- [31] VAN DEN BOS, Adriaan. Parameter estimation for scientists and engineers. John Wiley & Sons, 2007
- [32] VERA M, Flaminio; GUTIERREZ, Ana Isabel; MUÑOZ, Aldemar. "Modelización y control de un sistema neumático usando control inteligente". Scientia et Technica, 2007, vol. 1, no 34.
- [33] WATTON, Jhon. "Fluid Power Systems", Inglaterra; Prentice Hall International, 1989
- [34] ZORLU, Ahmet; OZSOY, Ahmet Zorlu Can; KUZUCU, Ahmet. "Experimental modeling of a pneumatic system". En Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference. IEEE, 2003. p. 453-461.

ANEXOS

Anexo 1 Adquisición de datos e identificación de sistemas usando Matlab y calibración de la tarjeta de adquisición de datos

La obtención del modelo matemático requerido para implementar la acción de control usando identificación de parámetros debe partir de la adquisición de los datos experimentales del fenómeno físico que se desea modelar, para tal fin se debe disponer de cinco elementos básicos:

- Sensor: Encargado de medir y convertir la variable de interés en una diferencia de potencial o una intensidad de corriente.
- Acondicionador de señal: Convertir la señal del sensor en una señal que sea aceptada por la tarjeta de adquisición de datos.
- Tarjeta de adquisición de datos: Convierte la señal analógica en digital y realiza la comunicación con el computador.
- Computador: Encargado de procesar y proporcionar el sistema de almacenamiento de datos.
- Software: Permite la comunicación entre el computador y la tarjeta.

A1.1 Tarjeta de adquisición de datos

La referencia de la tarjeta de adquisición de datos que se utilizó en el desarrollo del proyecto es DAQ (NI USB-6008) National Instruments

Figura A1. Tarjeta de Adquisición de datos



Características de funcionamiento

Entradas analógicas

Cantidad:	8
Resolución:	12 bits (diferencial), 11 (asimétrica)
Rata máxima de muestreo:	10kS/s
Rango de tensión:	
Diferencial:	$\pm 20V$, $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 4V$, $\pm 2.5V$, $\pm 2V$, $\pm 1.25V$, $\pm 1V$
Asimétrica:	$\pm 10V$
Tensión de trabajo:	$\pm 10V$
Impedancia de entrada:	144k Ω
Precisión absoluta en escala completa:	
Diferencial: Rango máximo ($\pm 20V$):	14.7mV
Rango mínimo ($\pm 1V$):	1.53mV
Asimétrica:	14.7mV

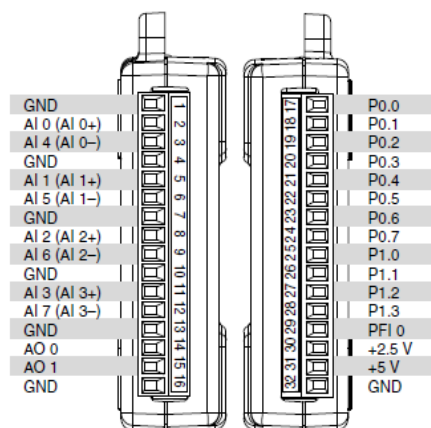
Salidas analógicas

Cantidad:	2
Resolución:	12 bits
Velocidad máxima de actualización:	150Hz
Rango de tensión:	0V a +5V
Impedancia:	50 Ω
Capacidad de corriente:	5mA
Estado de encendido:	0V
Velocidad de subida:	1V/ μ s
Corriente de corto circuito:	50mA
Precisión absoluta:	
Típica:	7mV
Máxima en escala completa:	36.4mV

Entradas/salidas digitales

Número de puertos:	12
Compatibilidad:	TTL, LVTTTL, CMOS
Rango absoluto de tensión:	-0.5V a 5.8V con respecto a tierra
Resistor Pull-up:	4.7k Ω a 5V
Estado de encendido:	Entrada

Figura A2. Diagrama de pines de la tarjeta de adquisición



A1.2 Proceso de calibración

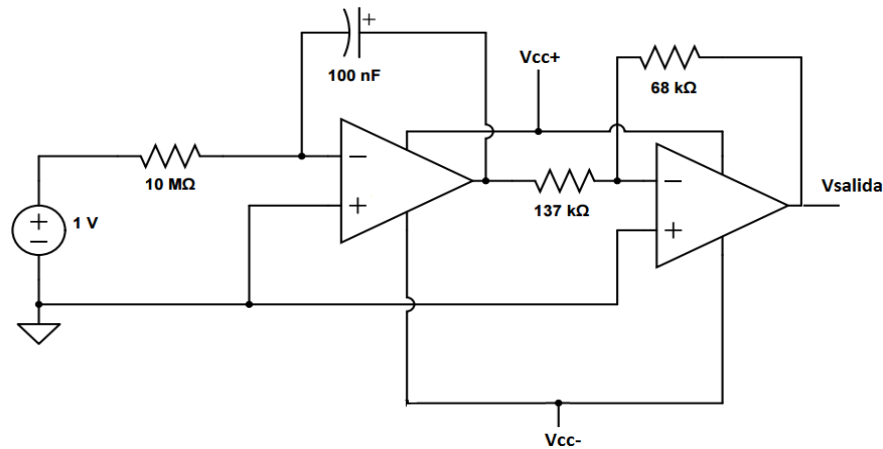
Todo proceso de calibración es un proceso de comparación en el cual se compara el valor medido por un elemento patrón con el valor medido por el instrumento a calibrar, en el caso de la tarjeta de adquisición de datos, el proceso consiste en comparar el comportamiento mostrado por los datos adquiridos por la tarjeta con el comportamiento real de un fenómeno ya conocido.

Se construye entonces un circuito electrónico del cual se conoce su comportamiento y el cual ha sido simulado para comprobarlo, luego se realiza la adquisición de los datos para comprobar que el comportamiento obtenido mediante simulación y el comportamiento mostrado por los datos adquiridos sean los mismos.

A1.2.1 Circuito para la calibración

Se utilizó en este caso un circuito con amplificadores operacionales funcionando como integrador, el cual se muestra en la figura siguiente, los amplificadores operacionales utilizados son LF353 y la tensión de suministro V_{cc} es de 12,8 V:

Figura A3. Circuito usado para la calibración de la tarjeta de adquisición



A1.3 Simulación

Para la simulación del circuito se utilizó el software Circuitlab, por ser un software libre, online y de fácil que de acuerdo a las pruebas realizadas genera resultados confiables. Igualmente conociendo el modelo matemático del sistema y usando la herramienta SIMULINK de MATLAB, se realizó una segunda simulación para corroborar los resultados anteriores.

Cuando se realizó la simulación el voltaje de suministro debió modificarse debido a que el simulador no tomaba en cuenta la diferencia entre la tensión de alimentación y la tensión de saturación (Tensión Swing), lo cual producía un comportamiento similar pero una mayor tensión de saturación.

Los resultados obtenidos de ambas simulaciones se presentan a continuación:

Figura A4. Simulación del circuito usando Cicuitlab

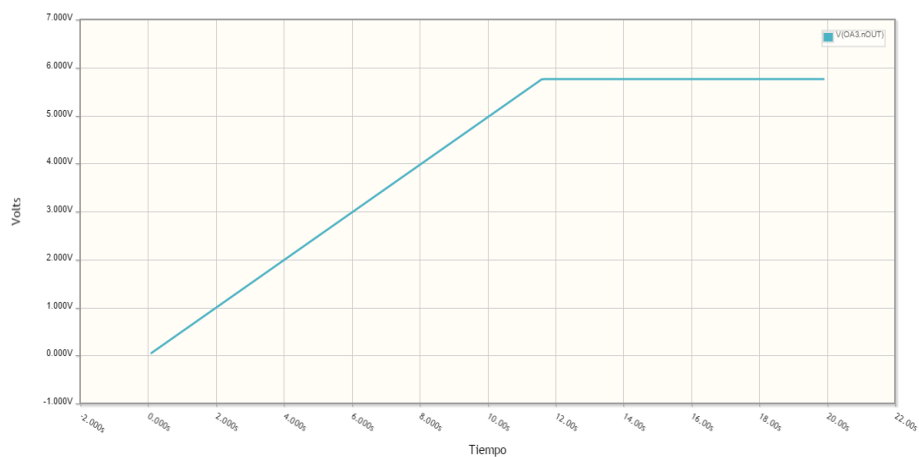
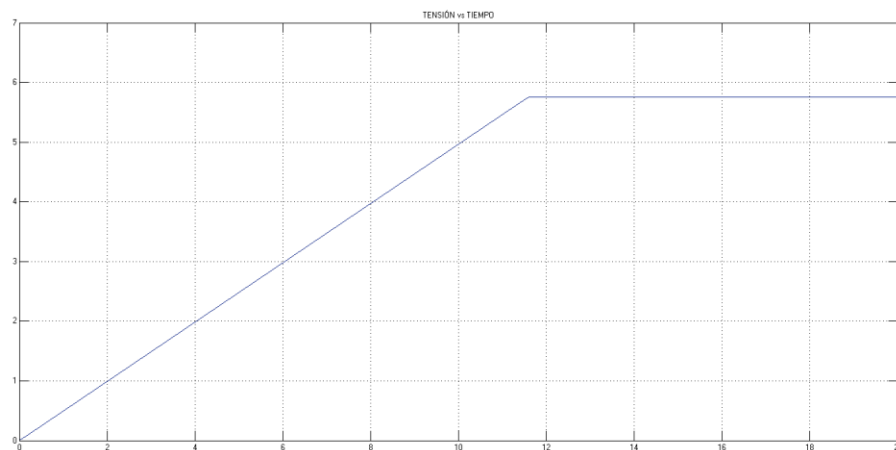


Figura A5. Simulación del circuito usando Matlab



A1.4 Adquisición de los datos usando Matlab

Como se mencionó anteriormente se necesita de un software para comunicar el computador con la tarjeta de adquisición de datos, en este caso se utilizó MATLAB, especialmente el “Toolbox” de adquisición de datos (Data Acquisition Toolbox™).

La *Toolbox* de adquisición de datos es un conjunto de funciones y archivos desarrollados en MATLAB, que permite una comunicación efectiva entre el

computador y la tarjeta de adquisición de datos. La tabla muestra los componentes de la *Toolbox* y sus propósitos.

Tabla A1.1 Componentes del toolbox de adquisición de Matlab

COMPONENTE	PROPÓSITO
Archivos M	Crear objetos, adquirir o extraer datos, configurar valores, evaluar la adquisición y los recursos.
Motor de adquisición de datos	Almacenar los objetos de dispositivo y sus valores, controlar el almacenamiento de datos y la sincronización de eventos
Adaptadores de hardware	Transmitir propiedades, datos y eventos entre el hardware y el motor de adquisición de datos

Fuente: Mathworks (2008)^[21]

Para el proceso de adquisición de datos se utilizó el siguiente programa:

```
clc
clear all
s=daq.createSession('ni');
ch = s.addAnalogInputChannel('dev1','ai0','Voltage')
s.DurationInSeconds=20;
[data,time]=s.startForeground();
plot(data)
```

Este programa se utiliza debido a la versión de MATLAB de 64 bits con que se cuenta, este programa realiza:

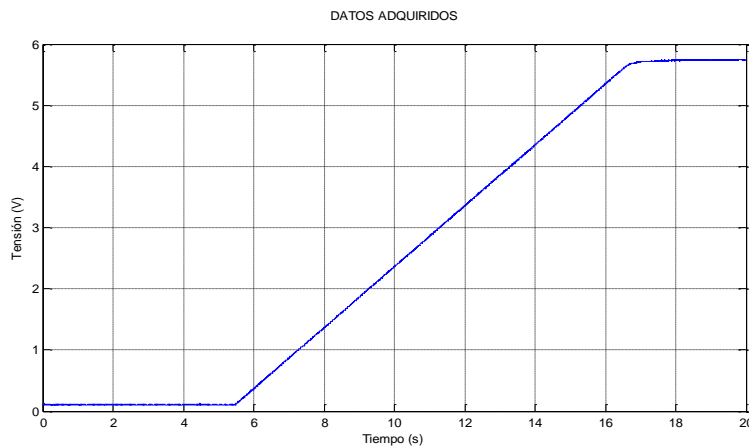
- Crear una sesión de adquisición de datos
- Asignar un canal de la tarjeta y el tipo de entrada a manejar (Tensión o Corriente)
- Designar un tiempo de duración, con este tipo orden se leen datos cada milésima de segundo durante el tiempo asignado. Es posible también

cambiar el tiempo de muestreo y el número de muestras. En este caso se utilizó la máxima resolución para tener una mayor precisión en la identificación.

- Generar dos vectores donde se almacenan los datos de tensión y el tiempo.
- Generar la gráfica de los datos tomados

Los datos obtenidos mediante la adquisición de datos se observan en la siguiente figura

Figura A5. Datos adquiridos desde Matlab



Como se puede observar el comportamiento es similar al simulado, la diferencia de tiempo inicial es debido al tiempo de activación del Switch. Por lo tanto se puede considerar que la tarjeta de adquisición de datos utilizada está calibrada correctamente.

A1.5 Identificación del sistema

Haciendo uso del Toolbox de identificación de sistemas de MATLAB se realiza el proceso de identificación de los parámetros del sistema basado en los datos adquiridos experimentalmente

El toolbox de identificación es una plataforma que permite realizar el proceso de una forma intuitiva, el cual permite obtener modelos de formas distintas partiendo de datos que pueden ser series en el dominio del tiempo o de la frecuencia, de todas las formas de modelos que se pueden obtener, se presentan dos de ellas, los modelos de procesos y los modelos en función de transferencia.

Los modelos de proceso, son representación en forma de función de transferencia que describe la dinámica de sistemas lineales en función de los siguientes parámetros: Ganancia estática, polos y ceros de la función, retardo del sistema y la posibilidad de un integrador. La identificación la realiza con datos en el dominio del tiempo.

Los modelos de función de transferencia representan la relación entre la entrada y la salida del sistema en forma de polinomios en el numerador y denominador de la misma, estos modelos permiten trabajar con datos reales y complejos, así como datos en el dominio de la frecuencia o el tiempo. Otra ventaja que se tiene con este tipo de modelo es la posibilidad de encontrar modelos continuos o discretos.

El método usado para encontrar los parámetros del modelo, puede seleccionarse entre Gauss-Newton, Gauss-Newton adaptativo, Levenberg-Marquardt, Búsqueda de gradiente, o método de Newton de región de confianza. Por defecto el utiliza un método automático, es decir, dependiendo de la aproximación utiliza cada uno de ellos hasta disminuir el error.

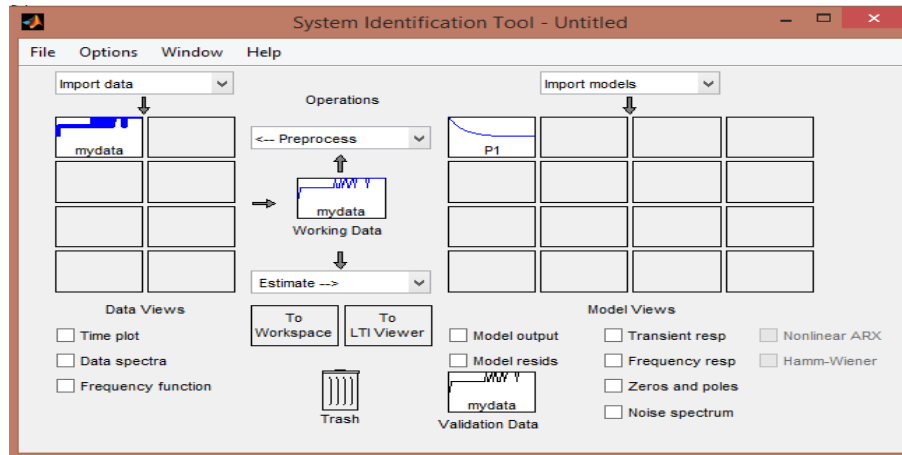
Una ventaja que se posee al utilizar el sistema de identificación, es que permite una validación automática del modelo, generando gráficas de comparación entre la respuesta del modelo identificado y los datos reales iniciales, o también permite obtener la gráfica de los intervalos de confianza para determinar qué tan cercano están el modelo identificado de los datos reales, la gráfica de residuos, el análisis en frecuencia y en el tiempo.

Las etapas para el proceso de identificación son:

- Filtrado de los datos, los datos de tiempo y tensión obtenidos en la etapa anterior del proceso, para trabajar solo con los datos correspondientes a la etapa posterior a la activación del switch y hasta el punto donde se logra la saturación del sistema.

- Utilización del Toolbox, mediante el comando “ident” se abre la ventana inicial en la cual se realiza todo el proceso de identificación, figura A6.

Figura A6. Sistema de identificación



Importación de los datos, seleccionando la opción de datos en el dominio del tiempo en la ventana anterior se genera un segundo cuadro de dialogo, en el cual se indican la entrada y la salida del sistema que se va a identificar, el tiempo de muestreo y el tiempo inicial para la identificación.

Estimación del modelo, seleccionando la opción de Process Models se crea un nuevo cuadro de dialogo en el cual se selecciona el tipo de sistema a identificar, número de polos, existencia de ceros, integradores o retardos, como el sistema se conoce que es un sistema de primer orden sin retardos, ni ceros o integradores se seleccionan estas opciones.

Figura A7. Importación de los datos para ser identificados

Import Data

Data Format for Signals
Time-Domain Signals

Workspace Variable
Input: entrada
Output: salida

Data Information
Data name: mydata
Starting time: 0
Sampling interval: 1/1000
More

Import Reset
Close Help

Figura A8. Selección del modelo a identificar

Process Models

Model Transfer Function
K
(1 + Tp1 s)

Poles
1 All real
Zero
Delay
Integrator

Disturbance Model: None
Focus: Simulation

Parameter Known

Parameter	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	181.9059	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	364.5914	Auto	[0 207611.9]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

Initial Guess
☒ Auto-selected
☐ From existing model
☐ User-defined Value-->Initial Guess

Initial condition: Auto
Covariance: Estimate Options...

☐ Display progress Continue

Name: P1 Estimate Close Help

Generar la función de transferencia, conociendo los parámetros del sistema la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{181.9059}{364.5914s+1} \quad (A1)$$

Usando la herramienta Simulink de MATLAB, se simula el comportamiento del sistema usando el modelo teórico y usando el modelo obtenido mediante el proceso de adquisición de datos e identificación del sistema.

Figura A9. Simulación de comparación entre el modelo identificado y el modelo real

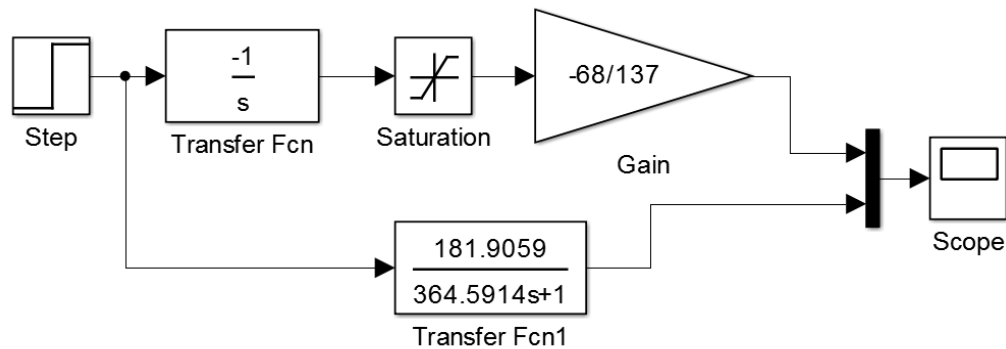
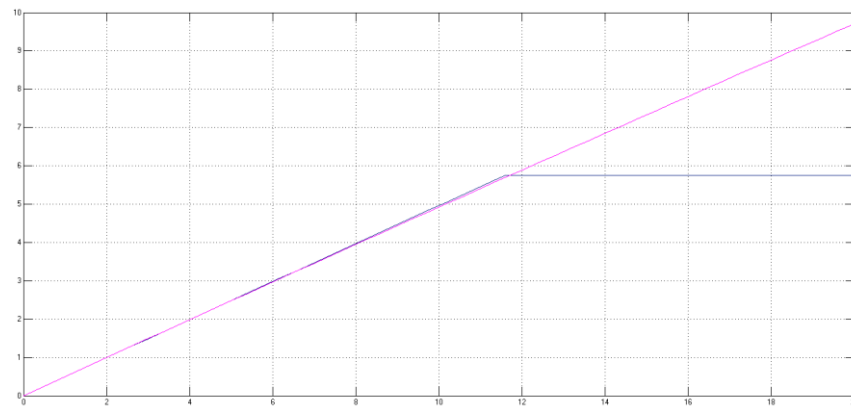


Figura A10. Resultado de la simulación



Como se observan, las dos gráficas tienen un comportamiento muy similar por lo cual se considera que la identificación del sistema es correcta.

Anexo 2 Tablas de la identificación del sistema

A continuación se presenta una de las tablas que se obtuvieron durante el proceso de identificación final del sistema

Tabla A2.1 Datos de identificación del sistema

Tensión de salida (V)	Corriente de entrada (mA)	Tiempo (s)	Tensión de salida (V)	Corriente de entrada (mA)	Tiempo (s)	Tensión de salida (V)	Corriente de entrada (mA)	Tiempo (s)
1,258	11,3	0,1	6,324	11,8	26,8	4,612	12,8	53,5
1,298	11,3	0,2	6,335	11,8	26,9	4,581	12,8	53,6
1,278	11,3	0,3	6,304	11,8	27	4,540	12,8	53,7
1,329	11,3	0,4	6,335	11,8	27,1	4,551	12,8	53,8
1,349	11,3	0,5	6,335	11,8	27,2	4,540	12,8	53,9
1,390	11,3	0,6	6,314	11,8	27,3	4,520	12,8	54
1,441	11,3	0,7	6,335	11,8	27,4	4,520	12,8	54,1
1,451	11,3	0,8	6,345	11,8	27,5	4,510	12,8	54,2
1,482	11,3	0,9	6,324	11,8	27,6	4,469	12,8	54,3
1,543	11,3	1	6,375	11,8	27,7	4,438	12,8	54,4
1,553	11,3	1,1	6,365	11,8	27,8	4,449	12,8	54,5
1,604	11,3	1,2	6,365	11,8	27,9	4,449	12,8	54,6
1,625	11,3	1,3	6,345	11,8	28	4,418	12,8	54,7
1,655	11,3	1,4	6,416	11,8	28,1	4,377	12,8	54,8
1,676	11,3	1,5	6,396	11,8	28,2	4,418	12,8	54,9
1,686	11,3	1,6	6,386	11,8	28,3	4,387	12,8	55
1,737	11,3	1,7	6,416	11,8	28,4	4,336	12,7	55,1
1,778	11,3	1,8	6,406	11,8	28,5	4,408	12,7	55,2
1,808	11,3	1,9	6,437	11,8	28,6	4,367	12,7	55,3
1,839	11,3	2	6,447	11,8	28,7	4,336	12,7	55,4
1,879	11,3	2,1	6,437	11,8	28,8	4,347	12,7	55,5
1,920	11,3	2,2	6,477	11,8	28,9	4,347	12,7	55,6
1,961	11,3	2,3	6,477	11,8	29	4,336	12,7	55,7
1,971	11,3	2,4	6,467	11,8	29,1	4,336	12,7	55,8
1,992	11,3	2,5	6,498	11,8	29,2	4,285	12,7	55,9
2,043	11,3	2,6	6,498	11,8	29,3	4,296	12,7	56
2,063	11,3	2,7	6,518	11,8	29,4	4,306	12,7	56,1
2,104	11,3	2,8	6,508	11,8	29,5	4,255	12,7	56,2
2,145	11,3	2,9	6,518	11,8	29,6	4,285	12,7	56,3
2,165	11,3	3	6,539	11,8	29,7	4,275	12,7	56,4
2,216	11,3	3,1	6,549	11,8	29,8	4,285	12,7	56,5
2,236	11,3	3,2	6,559	11,8	29,9	4,245	12,7	56,6
2,277	11,3	3,3	6,569	11,8	30	4,245	12,7	56,7
2,287	11,3	3,4	6,579	11,9	30,1	4,234	12,7	56,8
2,318	11,3	3,5	6,579	11,9	30,2	4,214	12,7	56,9
2,348	11,3	3,6	6,590	11,9	30,3	4,204	12,7	57
2,389	11,3	3,7	6,610	11,9	30,4	4,194	12,7	57,1
2,430	11,3	3,8	6,610	11,9	30,5	4,163	12,7	57,2
2,450	11,3	3,9	6,691	11,9	30,6	4,184	12,7	57,3

2,491	11,3	4	6,620	11,9	30,7	4,153	12,7	57,4
2,522	11,3	4,1	6,610	11,9	30,8	4,153	12,7	57,5
2,542	11,3	4,2	6,630	11,9	30,9	4,163	12,7	57,6
2,593	11,3	4,3	6,630	11,9	31	4,153	12,7	57,7
2,624	11,3	4,4	6,640	11,9	31,1	4,122	12,7	57,8
2,675	11,3	4,5	6,600	11,9	31,2	4,092	12,7	57,9
2,675	11,3	4,6	6,671	11,9	31,3	4,092	12,7	58
2,726	11,3	4,7	6,681	11,9	31,4	4,122	12,7	58,1
2,746	11,3	4,8	6,640	11,9	31,5	4,071	12,7	58,2
2,777	11,3	4,9	6,681	11,9	31,6	4,061	12,7	58,3
2,828	11,3	5	6,691	11,9	31,7	4,071	12,7	58,4
2,838	11,4	5,1	6,671	11,9	31,8	4,071	12,7	58,5
2,879	11,4	5,2	6,681	11,9	31,9	4,041	12,7	58,6
2,879	11,4	5,3	6,691	11,9	32	4,031	12,7	58,7
2,899	11,4	5,4	6,722	11,9	32,1	4,041	12,7	58,8
2,930	11,4	5,5	6,722	11,9	32,2	4,051	12,7	58,9
2,940	11,4	5,6	6,742	11,9	32,3	4,041	12,7	59
2,960	11,4	5,7	6,742	11,9	32,4	3,990	12,7	59,1
3,001	11,4	5,8	6,742	11,9	32,5	3,949	12,7	59,2
3,011	11,4	5,9	6,773	11,9	32,6	3,969	12,7	59,3
3,042	11,4	6	6,753	11,9	32,7	3,949	12,7	59,4
3,072	11,4	6,1	6,763	11,9	32,8	3,939	12,7	59,5
3,082	11,4	6,2	6,793	11,9	32,9	3,980	12,7	59,6
3,123	11,4	6,3	6,773	11,9	33	3,929	12,7	59,7
3,133	11,4	6,4	6,793	11,9	33,1	3,918	12,7	59,8
3,144	11,4	6,5	6,824	11,9	33,2	3,908	12,7	59,9
3,184	11,4	6,6	6,804	11,9	33,3	3,908	12,7	60
3,195	11,4	6,7	6,804	11,9	33,4	3,929	12,6	60,1
3,195	11,4	6,8	6,804	11,9	33,5	3,888	12,6	60,2
3,235	11,4	6,9	6,814	11,9	33,6	3,857	12,6	60,3
3,286	11,4	7	6,855	11,9	33,7	3,888	12,6	60,4
3,276	11,4	7,1	6,824	11,9	33,8	3,847	12,6	60,5
3,307	11,4	7,2	6,844	11,9	33,9	3,806	12,6	60,6
3,327	11,4	7,3	6,834	11,9	34	3,827	12,6	60,7
3,358	11,4	7,4	6,814	11,9	34,1	3,817	12,6	60,8
3,368	11,4	7,5	6,865	11,9	34,2	3,796	12,6	60,9
3,388	11,4	7,6	6,855	11,9	34,3	3,786	12,6	61
3,409	11,4	7,7	6,865	11,9	34,4	3,776	12,6	61,1
3,429	11,4	7,8	6,875	11,9	34,5	3,745	12,6	61,2
3,470	11,4	7,9	6,875	11,9	34,6	3,725	12,6	61,3
3,470	11,4	8	6,875	11,9	34,7	3,745	12,6	61,4
3,511	11,4	8,1	6,916	11,9	34,8	3,725	12,6	61,5
3,541	11,4	8,2	6,875	11,9	34,9	3,725	12,6	61,6
3,592	11,4	8,3	6,926	11,9	35	3,694	12,6	61,7
3,531	11,4	8,4	6,926	12,08	35,1	3,694	12,6	61,8
3,633	11,4	8,5	6,926	12,08	35,2	3,674	12,6	61,9
3,653	11,4	8,6	6,906	12,08	35,3	3,653	12,6	62
3,664	11,4	8,7	6,946	12,08	35,4	3,684	12,6	62,1
3,674	11,4	8,8	6,926	12,08	35,5	3,643	12,6	62,2
3,694	11,4	8,9	6,906	12,08	35,6	3,623	12,6	62,3
3,735	11,4	9	6,926	12,08	35,7	3,623	12,6	62,4

3,745	11,4	9,1	6,936	12,08	35,8	3,633	12,6	62,5
3,766	11,4	9,2	6,926	12,08	35,9	3,602	12,6	62,6
3,796	11,4	9,3	6,936	12,08	36	3,582	12,6	62,7
3,817	11,4	9,4	6,946	12,08	36,1	3,602	12,6	62,8
3,847	11,4	9,5	6,916	12,08	36,2	3,602	12,6	62,9
3,867	11,4	9,6	6,957	12,08	36,3	3,602	12,6	63
3,878	11,4	9,7	6,987	12,08	36,4	3,531	12,6	63,1
3,918	11,4	9,8	6,957	12,08	36,5	3,562	12,6	63,2
3,929	11,4	9,9	6,926	12,08	36,6	3,531	12,6	63,3
3,959	11,4	10	6,936	12,08	36,7	3,541	12,6	63,4
4,000	11,5	10,1	6,936	12,08	36,8	3,500	12,6	63,5
4,020	11,5	10,2	6,957	12,08	36,9	3,500	12,6	63,6
4,051	11,5	10,3	6,946	12,08	37	3,521	12,6	63,7
4,061	11,5	10,4	6,946	12,08	37,1	3,500	12,6	63,8
4,071	11,5	10,5	6,957	12,08	37,2	3,480	12,6	63,9
4,122	11,5	10,6	6,957	12,08	37,3	3,470	12,6	64
4,112	11,5	10,7	6,957	12,08	37,4	3,449	12,6	64,1
4,173	11,5	10,8	6,957	12,08	37,5	3,439	12,6	64,2
4,143	11,5	10,9	6,957	12,08	37,6	3,429	12,6	64,3
4,173	11,5	11	6,946	12,08	37,7	3,419	12,6	64,4
4,224	11,5	11,1	6,957	12,08	37,8	3,409	12,6	64,5
4,204	11,5	11,2	6,946	12,08	37,9	3,388	12,6	64,6
4,245	11,5	11,3	6,946	12,08	38	3,419	12,6	64,7
4,214	11,5	11,4	6,946	12,08	38,1	3,388	12,6	64,8
4,306	11,5	11,5	6,967	12,08	38,2	3,378	12,6	64,9
4,316	11,5	11,6	6,967	12,08	38,3	3,348	12,6	65
4,316	11,5	11,7	6,967	12,08	38,4	3,327	12,5	65,1
4,326	11,5	11,8	6,946	12,08	38,5	3,358	12,5	65,2
4,357	11,5	11,9	6,946	12,08	38,6	3,358	12,5	65,3
4,377	11,5	12	6,967	12,08	38,7	3,307	12,5	65,4
4,387	11,5	12,1	6,977	12,08	38,8	3,307	12,5	65,5
4,418	11,5	12,2	6,977	12,08	38,9	3,276	12,5	65,6
4,418	11,5	12,3	6,957	12,08	39	3,276	12,5	65,7
4,469	11,5	12,4	6,977	12,08	39,1	3,297	12,5	65,8
4,479	11,5	12,5	6,967	12,08	39,2	3,297	12,5	65,9
4,500	11,5	12,6	6,957	12,08	39,3	3,266	12,5	66
4,500	11,5	12,7	6,967	12,08	39,4	3,307	12,5	66,1
4,520	11,5	12,8	6,977	12,08	39,5	3,297	12,5	66,2
4,551	11,5	12,9	6,957	12,08	39,6	3,266	12,5	66,3
4,551	11,5	13	7,007	12,08	39,7	3,266	12,5	66,4
4,591	11,5	13,1	7,007	12,08	39,8	3,276	12,5	66,5
4,622	11,5	13,2	6,967	12,08	39,9	3,276	12,5	66,6
4,622	11,5	13,3	6,977	12,08	40	3,266	12,5	66,7
4,642	11,5	13,4	6,967	13	40,1	3,286	12,5	66,8
4,673	11,5	13,5	6,906	13	40,2	3,266	12,5	66,9
4,714	11,5	13,6	6,977	13	40,3	3,246	12,5	67
4,714	11,5	13,7	6,957	13	40,4	3,235	12,5	67,1
4,734	11,5	13,8	6,957	13	40,5	3,256	12,5	67,2
4,754	11,5	13,9	6,936	13	40,6	3,246	12,5	67,3
4,765	11,5	14	6,977	13	40,7	3,256	12,5	67,4
4,816	11,5	14,1	6,946	13	40,8	3,256	12,5	67,5

4,826	11,5	14,2	6,987	13	40,9	3,205	12,5	67,6
4,836	11,5	14,3	6,946	13	41	3,195	12,5	67,7
4,846	11,5	14,4	6,844	13	41,1	3,246	12,5	67,8
4,897	11,5	14,5	6,834	13	41,2	3,256	12,5	67,9
4,918	11,5	14,6	6,793	13	41,3	3,225	12,5	68
4,928	11,5	14,7	6,814	13	41,4	3,215	12,5	68,1
4,928	11,5	14,8	6,783	13	41,5	3,195	12,5	68,2
4,969	11,5	14,9	6,763	13	41,6	3,195	12,5	68,3
4,989	11,5	15	6,732	13	41,7	3,205	12,5	68,4
4,979	11,6	15,1	6,702	13	41,8	3,215	12,5	68,5
5,030	11,6	15,2	6,681	13	41,9	3,184	12,5	68,6
5,050	11,6	15,3	6,661	13	42	3,174	12,5	68,7
5,050	11,6	15,4	6,640	13	42,1	3,174	12,5	68,8
5,030	11,6	15,5	6,630	13	42,2	3,154	12,5	68,9
5,030	11,6	15,6	6,600	13	42,3	3,133	12,5	69
5,091	11,6	15,7	6,549	13	42,4	3,144	12,5	69,1
5,132	11,6	15,8	6,549	13	42,5	3,174	12,5	69,2
5,152	11,6	15,9	6,539	13	42,6	3,113	12,5	69,3
5,121	11,6	16	6,528	13	42,7	3,144	12,5	69,4
5,142	11,6	16,1	6,498	13	42,8	3,123	12,5	69,5
5,152	11,6	16,2	6,539	13	42,9	3,123	12,5	69,6
5,213	11,6	16,3	6,467	13	43	3,133	12,5	69,7
5,203	11,6	16,4	6,416	13	43,1	3,103	12,5	69,8
5,193	11,6	16,5	6,396	13	43,2	3,133	12,5	69,9
5,213	11,6	16,6	6,396	13	43,3	3,154	12,5	70
5,254	11,6	16,7	6,365	13	43,4	3,113	12,4	70,1
5,274	11,6	16,8	6,355	13	43,5	3,103	12,4	70,2
5,264	11,6	16,9	6,335	13	43,6	3,103	12,4	70,3
5,285	11,6	17	6,314	13	43,7	3,113	12,4	70,4
5,315	11,6	17,1	6,253	13	43,8	3,123	12,4	70,5
5,295	11,6	17,2	6,263	13	43,9	3,123	12,4	70,6
5,325	11,6	17,3	6,212	13	44	3,113	12,4	70,7
5,346	11,6	17,4	6,212	13	44,1	3,123	12,4	70,8
5,336	11,6	17,5	6,182	13	44,2	3,113	12,4	70,9
5,305	11,6	17,6	6,151	13	44,3	3,123	12,4	71
5,376	11,6	17,7	6,131	13	44,4	3,113	12,4	71,1
5,376	11,6	17,8	6,121	13	44,5	3,133	12,4	71,2
5,468	11,6	17,9	6,090	13	44,6	3,113	12,4	71,3
5,448	11,6	18	6,059	13	44,7	3,072	12,4	71,4
5,488	11,6	18,1	6,049	13	44,8	3,072	12,4	71,5
5,448	11,6	18,2	5,998	13	44,9	3,082	12,4	71,6
5,478	11,6	18,3	5,957	13	45	3,093	12,4	71,7
5,539	11,6	18,4	5,957	12,9	45,1	3,082	12,4	71,8
5,509	11,6	18,5	5,937	12,9	45,2	3,082	12,4	71,9
5,529	11,6	18,6	5,906	12,9	45,3	3,082	12,4	72
5,519	11,6	18,7	5,886	12,9	45,4	3,113	12,4	72,1
5,580	11,6	18,8	5,886	12,9	45,5	3,082	12,4	72,2
5,580	11,6	18,9	5,866	12,9	45,6	3,062	12,4	72,3
5,550	11,6	19	5,835	12,9	45,7	3,093	12,4	72,4
5,601	11,6	19,1	5,825	12,9	45,8	3,082	12,4	72,5
5,631	11,6	19,2	5,815	12,9	45,9	3,032	12,4	72,6

5,611	11,6	19,3	5,794	12,9	46	3,072	12,4	72,7
5,652	11,6	19,4	5,754	12,9	46,1	3,082	12,4	72,8
5,672	11,6	19,5	5,743	12,9	46,2	3,072	12,4	72,9
5,652	11,6	19,6	5,723	12,9	46,3	3,062	12,4	73
5,672	11,6	19,7	5,723	12,9	46,4	3,072	12,4	73,1
5,713	11,6	19,8	5,662	12,9	46,5	3,093	12,4	73,2
5,672	11,6	19,9	5,682	12,9	46,6	3,062	12,4	73,3
5,733	11,6	20	5,662	12,9	46,7	3,082	12,4	73,4
5,662	11,7	20,1	5,662	12,9	46,8	3,093	12,4	73,5
5,723	11,7	20,2	5,621	12,9	46,9	3,062	12,4	73,6
5,692	11,7	20,3	5,590	12,9	47	3,082	12,4	73,7
5,743	11,7	20,4	5,570	12,9	47,1	3,042	12,4	73,8
5,805	11,7	20,5	5,570	12,9	47,2	3,082	12,4	73,9
5,815	11,7	20,6	5,539	12,9	47,3	3,093	12,4	74
5,845	11,7	20,7	5,509	12,9	47,4	3,052	12,4	74,1
5,805	11,7	20,8	5,478	12,9	47,5	3,021	12,4	74,2
5,825	11,7	20,9	5,448	12,9	47,6	3,032	12,4	74,3
5,866	11,7	21	5,468	12,9	47,7	3,052	12,4	74,4
5,825	11,7	21,1	5,437	12,9	47,8	3,072	12,4	74,5
5,815	11,7	21,2	5,397	12,9	47,9	3,062	12,4	74,6
5,855	11,7	21,3	5,387	12,9	48	3,072	12,4	74,7
5,866	11,7	21,4	5,346	12,9	48,1	3,062	12,4	74,8
5,917	11,7	21,5	5,346	12,9	48,2	3,052	12,4	74,9
5,876	11,7	21,6	5,325	12,9	48,3	3,052	12,4	75
5,917	11,7	21,7	5,305	12,9	48,4	3,042	12,3	75,1
5,896	11,7	21,8	5,264	12,9	48,5	3,001	12,3	75,2
5,917	11,7	21,9	5,244	12,9	48,6	3,032	12,3	75,3
5,947	11,7	22	5,213	12,9	48,7	3,011	12,3	75,4
5,957	11,7	22,1	5,193	12,9	48,8	3,042	12,3	75,5
5,957	11,7	22,2	5,203	12,9	48,9	3,042	12,3	75,6
5,947	11,7	22,3	5,132	12,9	49	3,032	12,3	75,7
5,968	11,7	22,4	5,213	12,9	49,1	3,011	12,3	75,8
5,988	11,7	22,5	5,132	12,9	49,2	3,062	12,3	75,9
5,968	11,7	22,6	5,142	12,9	49,3	3,021	12,3	76
5,978	11,7	22,7	5,101	12,9	49,4	3,042	12,3	76,1
5,957	11,7	22,8	5,091	12,9	49,5	3,042	12,3	76,2
6,039	11,7	22,9	5,060	12,9	49,6	3,072	12,3	76,3
6,039	11,7	23	5,070	12,9	49,7	3,032	12,3	76,4
6,049	11,7	23,1	5,060	12,9	49,8	3,052	12,3	76,5
6,029	11,7	23,2	5,020	12,9	49,9	3,062	12,3	76,6
6,049	11,7	23,3	5,020	12,9	50	3,072	12,3	76,7
6,070	11,7	23,4	4,999	12,8	50,1	3,042	12,3	76,8
6,080	11,7	23,5	4,999	12,8	50,2	3,021	12,3	76,9
6,100	11,7	23,6	5,030	12,8	50,3	3,032	12,3	77
6,110	11,7	23,7	4,999	12,8	50,4	3,052	12,3	77,1
6,090	11,7	23,8	4,958	12,8	50,5	3,062	12,3	77,2
6,121	11,7	23,9	4,938	12,8	50,6	3,052	12,3	77,3
6,131	11,7	24	4,948	12,8	50,7	3,032	12,3	77,4
6,121	11,7	24,1	4,938	12,8	50,8	3,032	12,3	77,5
6,131	11,7	24,2	4,907	12,8	50,9	3,042	12,3	77,6
6,141	11,7	24,3	4,887	12,8	51	3,011	12,3	77,7

6,141	11,7	24,4	4,918	12,8	51,1	3,021	12,3	77,8
6,141	11,7	24,5	4,867	12,8	51,2	3,021	12,3	77,9
6,172	11,7	24,6	4,867	12,8	51,3	3,011	12,3	78
6,161	11,7	24,7	4,907	12,8	51,4	3,001	12,3	78,1
6,172	11,7	24,8	4,907	12,8	51,5	2,981	12,3	78,2
6,192	11,7	24,9	4,816	12,8	51,6	2,981	12,3	78,3
6,172	11,7	25	4,826	12,8	51,7	2,981	12,3	78,4
6,202	11,8	25,1	4,805	12,8	51,8	2,960	12,3	78,5
6,212	11,8	25,2	4,795	12,8	51,9	2,981	12,3	78,6
6,202	11,8	25,3	4,795	12,8	52	2,970	12,3	78,7
6,243	11,8	25,4	4,744	12,8	52,1	2,981	12,3	78,8
6,233	11,8	25,5	4,734	12,8	52,2	2,950	12,3	78,9
6,253	11,8	25,6	4,703	12,8	52,3	2,981	12,3	79
6,284	11,8	25,7	4,703	12,8	52,4	2,950	12,3	79,1
6,253	11,8	25,8	4,744	12,8	52,5	2,970	12,3	79,2
6,233	11,8	25,9	4,693	12,8	52,6	2,960	12,3	79,3
6,294	11,8	26	4,673	12,8	52,7	2,960	12,3	79,4
6,304	11,8	26,1	4,693	12,8	52,8	2,970	12,3	79,5
6,243	11,8	26,2	4,663	12,8	52,9	2,940	12,3	79,6
6,294	11,8	26,3	4,622	12,8	53	2,991	12,3	79,7
6,273	11,8	26,4	4,663	12,8	53,1	2,940	12,3	79,8
6,314	11,8	26,5	4,642	12,8	53,2	2,950	12,3	79,9
6,324	11,8	26,6	4,612	12,8	53,3	2,950	12,3	80
6,294	11,8	26,7	4,602	12,8	53,4			

Anexo 3 Catálogo de instrumentos utilizados

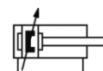
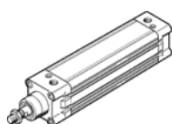
A3.1 CILINDRO

Cilindros normalizados DNC-50-320-PPV-A

Número pieza: 163378

FESTO

según ISO 15552, con tubo de cilindro perfilado, con amortiguación de final de carrera regulable por ambos lados.



Hoja de datos

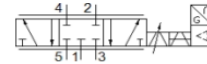
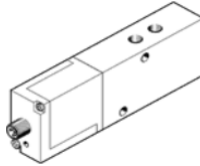
Caracter.	Propiedades
Carrera	320 mm
Diámetro del émbolo	50 mm
Rosca del vástago	M16x1,5
Amortiguación	PPV: Amortiguación neumática regulable a ambos lados
Posición de montaje	indistinto
Corresponde a la norma	ISO 15552 (hasta ahora también VDMA 24652, ISO 6431, NF E49 003.1, UNI 10290)
Extremo del vástago	Rosca exterior
Construcción	Émbolo Vástago Tubo perfilado
Detección de la posición	Para detectores de posición
Variantes	vástago simple
Presión de funcionamiento	0,6 ... 12 bar
Forma de funcionamiento	De efecto doble
Fluido	Aire comprimido según ISO8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación (necesaria en otro modo de funcionamiento)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 80 °C
Homologación	Germanischer Lloyd
Energía del impacto en las posiciones finales	0,2 J
Carrera de amortiguación	22 mm
Fuerza teórica con 6 bar, retroceso	990 N
Fuerza teórica con 6 bar, avance	1.178 N
Masa móvil con carrera de 0 mm	538 g
Peso adicional por 10 mm de carrera	64 g
Peso básico con carrera de 0 mm	1.260 g
Masa adicional por 10 mm de carrera	25 g
Tipo de fijación	con rosca interior con accesorios
Conexión neumática	G1/4
Indicación sobre el material	Conforme con RoHS
Información sobre el material de la tapa	Fundición inyectada de aluminio recubierto
Información sobre el material de las juntas	TPE-U(PU)
Información sobre el material del vástago	Acero de aleación fina
Información sobre el material de la camisa del cilindro	Aleación forjable de aluminio Anodizado deslizante

A3.2VÁLVULA

válvula distribuidora proporcional MPYE-5-1/4-420-B

Número de artículo: 161980

FESTO



Hoja de datos

Característica	Propiedades
Diámetro nominal	8 mm
Tipo de accionamiento	eléctrico
Principio de hermetización	duro
Posición de montaje	indistinto
Construcción	Corredera
Tipo de reposición	muelle magnético
Medidas de seguridad	Posición de seguridad MPYE: en caso de una ruptura del cable de alimentación, avance hacia la posición intermedia bloqueada
Tipo de control	directo
Sentido del flujo	no reversible
Función de las válvulas	5/3 cerrada
Polos inconfundibles	para valor nominal
Presión de funcionamiento	0 ... 10 bar
Valor B	0,23
Valor C	6,25 l/sbar
Caudal nominal normal	1.400 l/min
Frecuencia límite	80 Hz
Histéresis máxima	0,4 %
Margen de tensión de funcionamiento DC	17 ... 30 V
Ondulación residual	5 %
Valores NOMINAL/REAL	Tipo de corriente 4 - 20 mA
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [6:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Sin opción de funcionamiento con lubricación
Marca CE (ver declaración de conformidad)	según la normativa UE sobre EMC
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura del medio	5 ... 40 °C
Tipo de protección	IP65
Temperatura ambiente	0 ... 50 °C
Homologación	RCM Mark
Peso del producto	510 g
Conexión eléctrica	Conector forma redondo M12x1 4 contactos
Tipo de fijación	con taladro pasante
Conexión neumática 1	G1/4
Conexión neumática 2	G1/4
Conexión neumática 3	G1/4
Conexión neumática 4	G1/4
Conexión neumática 5	G1/4
Indicación sobre el material	Conforme con RoHS
Información sobre el material de la tapa	ABS recubierto
Información sobre el material de las juntas	NBR
Información sobre el material del cuerpo	Aluminio anodizado

A3.3POTENCIOMETRO

sistema de medición de recorrido
MLO-POT-360-LWG

Número de artículo: 152647



analógico, con medición absoluta del recorrido, carrera eléctrica útil de 360 mm, para controlador de ejes SPC-100



Hoja de datos

Característica	Propiedades
Marca CE (ver declaración de conformidad)	según la normativa UE sobre EMC
Principio de medición del sistema de medición de recorrido	analógico
Temperatura ambiente	-30 ... 100 °C
Corriente de arrastre recomendada	< 1 µA
Corriente de curso máxima temporal	10 mA
Velocidad máxima del proceso	5 m/s
Aceleración máxima en el proceso	200 m/s ²
Resolución recorrido	0,01 mm
Linealidad independiente	0,05 %
Coefficiente térmico	5 ppm/K
Carrera	360 mm
Señal de salida	analógico
Resistencia de conexión	5 kOhm
Tolerancia de la resistencia de conexión	20 %
Tensión nominal de funcionamiento DC	10 V
Tensión de funcionamiento DC máxima	42 V
Fluctuación de tensión permisible	< 1 %
Consumo máximo de corriente	4 mA
Conexión eléctrica	Conector Forma rectangular 16 mm 4 contactos
Construcción	perfil redondo con barra de compresión
Desviación angular de la unidad de arrastre	± 12,5 °
Posición de montaje	indistinto
Peso del producto	850 g
Información sobre el material del cuerpo	Aleación forjable de aluminio anodizado
Información sobre el material de la tapa	PBT reforzado
Información sobre el material de la biela	Acero inoxidable de aleación fina
Información sobre el material de la junta apoyo	NBR
Información sobre el material de la junta de la barra	PTFE
Tipo de protección	IP65 según IEC 60529
Resistencia a vibraciones según DIN/IEC 68 parte 2-6	controlado según grado 2
Resistencia permanente a choques según DIN/IEC 68 parte 2-82	controlado según grado 2

A3.4 SENSOR DE PRESIÓN

Pressure

Freescall Semiconductor

MPX5700
Rev 9, 09/2009

MPX5700 Series

0 to 700 kPa (0 to 101.5 psi)
15 to 700 kPa (2.18 to 101.5 psi)
0.2 to 4.7 V Output

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated


The MPX5700 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features


- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Available in Absolute, Differential and Gauge Configurations
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element

ORDERING INFORMATION								
Device Name	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Device Name
		None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
Unibody Package (MPX5700 Series)								
MPX5700A	867	*					*	MPX5700A
MPX5700AP	867B		*				*	MPX5700AP
MPX5700AS	867E		*				*	MPX5700AS
MPX5700ASX	867F		*				*	MPX5700ASX
MPX5700D	867	*				*		MPX5700D
MPX5700DP	867C			*		*		MPX5700DP
MPX5700GP	867B		*		*			MPX5700GP
MPX5700GP1	867B		*		*			MPX5700GP
MPX5700GS	867E		*		*			MPX5700D


UNIBODY PACKAGES




MPX5700A/D
CASE 867-08




MPX5700AP/GP/GP1
CASE 867B-04



MPX5700DP
CASE 867C-05



MPX5700AS/GS
CASE 867E-03



MPX5700ASX
CASE 867F-03

Pressure

Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$. Decoupling circuit shown in required to meet electrical specifications.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾					
Gauge, Differential: MPX5700D	P_{OP}	0	—	700	kPa
Absolute: MPX5700A		15	—	700	
Supply Voltage ⁽²⁾	V_{IS}	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_Q	—	7.0	10	mAdc
Zero Pressure Offset ⁽³⁾					
Gauge, Differential (0 to 85°C)	V_{OF}	0.088	0.2	0.313	Vdc
Absolute (0 to 85°C)		0.184	—	0.409	
Full Scale Output ⁽⁴⁾					
(0 to 85°C)	V_{FSO}	4.587	4.7	4.813	Vdc
Full Scale Span ⁽⁵⁾					
(0 to 85°C)	V_{FSS}	—	4.5	—	Vdc
Accuracy ⁽⁶⁾					
(0 to 85°C)	—	—	—	+2.5	% V_{FSS}
Sensitivity	V/PSI	—	6.4	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{OS}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms

1. 1.0 kPa (psi/Pascal) equals 0.145 psi.

2. Device is millimetric within this specified excitation range.

3. Offset (V_{OF}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.

5. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

6. Accuracy (error budget) consists of the following:

Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.

Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.

Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.

TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.

TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.

Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C.

7. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.

8. Warm-Up Time is defined as the time required for the device to meet the specified output voltage after the pressure has been stabilized.

MPX5700

2

Sensors
Freescale Semiconductor

Maximum Ratings

Table 2. Maximum Ratings⁽¹⁾

Parameter	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure ⁽²⁾ (P2 < 1 Atmosphere)	$P_{1,max}$	2500	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	-40 to +125	°C

- Maximum Ratings apply to Case 867 only. Extended exposure at the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.
- This sensor is designed for applications where P1 is always greater than, or equal to P2. P2 maximum is 500 kPa.

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry integrated on a pressure sensor chip.

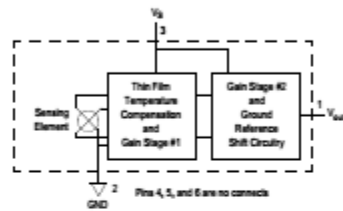


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

Pressure

On-chip Temperature Compensation and Calibration

Figure 3 illustrates both the Differential/Gauge and the Absolute Sensing Chip in the basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm. (For use of the MPX5700D in a high-pressure cyclic application, consult the factory.)

The MPX5700 series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor

performance and long-term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

Figure 2 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit shown in . The output will saturate outside of the specified pressure range. shows the recommended decoupling circuit for interfacing the output of the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

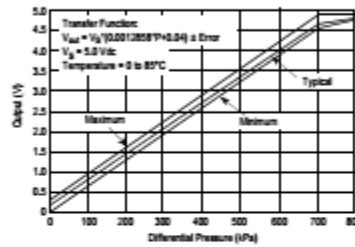


Figure 2. Output vs. Pressure Differential

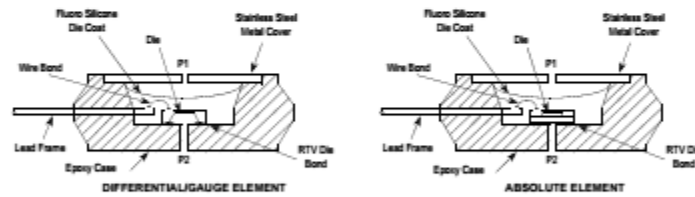


Figure 3. Cross-Sectional Diagrams (not to scale)

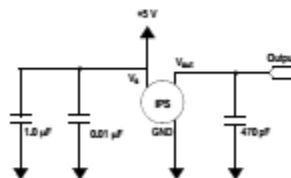


Figure 4. Recommended Power Supply Decoupling and Output Filtering
(For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646)

MPX5700

4

Sensors
Freescale Semiconductor

Sinopsis del producto

1

1.1 Introducción al PLC S7-1200

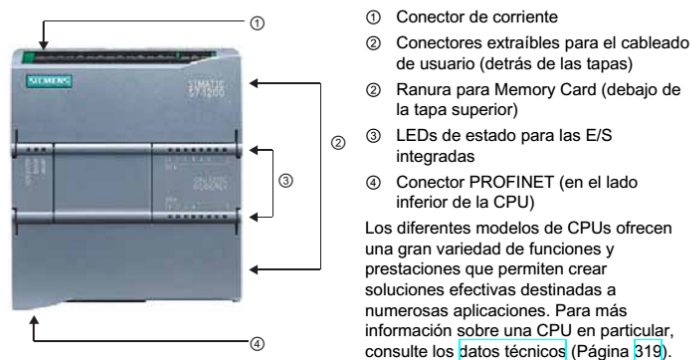
El controlador lógico programable (PLC) S7-1200 ofrece la flexibilidad y capacidad de controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas tareas de automatización. Gracias a su diseño compacto, configuración flexible y amplio juego de instrucciones, el S7-1200 es idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones.

La CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, así como circuitos de entrada y salida en una carcasa compacta, conformando así un potente PLC. Una vez cargado el programa en la CPU, ésta contiene la lógica necesaria para vigilar y controlar los dispositivos de la aplicación. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana, instrucciones de conteo y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos inteligentes.

Numerosas funciones de seguridad protegen el acceso tanto a la CPU como al programa de control:

- Toda CPU ofrece protección por contraseña que permite configurar el acceso a sus funciones.
- Es posible utilizar la "protección de know-how" para ocultar el código de un bloque específico. Encontrará más detalles en el capítulo "Principios básicos de programación" (Página 99).

La CPU incorpora un puerto PROFINET para la comunicación en una red PROFINET. Los módulos de comunicación están disponibles para la comunicación en redes RS485 o RS232.



Síntesis del producto

1.1 Introducción al PLC S7-1200

Función	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C
Dimensiones físicas (mm)	90 x 100 x 75		110 x 100 x 75
Memoria de usuario			
• Memoria de trabajo	• 25 KB		• 50 KB
• Memoria de carga	• 1 MB		• 2 MB
• Memoria remanente	• 2 KB		• 2 KB
E/S integradas locales			
• Digitales	• 6 entradas/4 salidas	• 8 entradas/6 salidas	• 14 entradas/10 salidas
• Analógicas	• 2 entradas	• 2 entradas	• 2 entradas
Tamaño de la memoria imagen de proceso	1024 bytes para entradas (I) y 1024 bytes para salidas (Q)		
Área de marcas (M)	4096 bytes		8192 bytes
Ampliación con módulos de señales	Ninguna	2	8
Signal Board	1		
Módulos de comunicación	3 (ampliación en el lado izquierdo)		
Contadores rápidos	3	4	6
• Fase simple	• 3 a 100 kHz	• 3 a 100 kHz 1 a 30 kHz	• 3 a 100 kHz 3 a 30 kHz
• Fase en cuadratura	• 3 a 80 kHz	• 3 a 80 kHz 1 a 20 kHz	• 3 a 80 kHz 3 a 20 kHz
Salidas de impulsos	2		
Memory Card	SIMATIC Memory Card (opcional)		
Tiempo de respaldo del reloj de tiempo real	Típico: 10 días / Mínimo: 6 días a 40 °C		
PROFINET	1 puerto de comunicación Ethernet		
Velocidad de ejecución de funciones matemáticas con números reales	18 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución booleana	0,1 µs/instrucción		

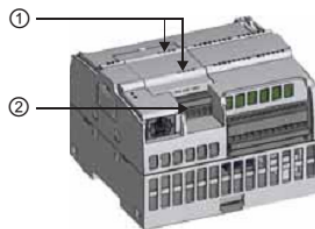
La gama S7-1200 ofrece una gran variedad de módulos de señales y Signal Boards que permiten ampliar las prestaciones de la CPU. También es posible instalar módulos de comunicación adicionales para soportar otros protocolos de comunicación. Para más información sobre un módulo en particular, consulte los [datos técnicos](#) (Página [319](#)).

Módulo		Sólo entradas	Sólo salidas	Entradas y salidas
Módulo de señales (SM)	Digital	8 entradas DC	8 salidas DC 8 salidas de relé	8 entradas DC/8 salidas DC 8 entradas DC/8 salidas de relé
		16 entradas DC	16 salidas DC 16 salidas de relé	16 entradas DC/16 salidas DC 16 entradas DC/16 salidas de relé
	Analógico	4 entradas analógicas 8 entradas analógicas	2 salidas analógicas 4 salidas analógicas	4 entradas analógicas/2 salidas analógicas
Signal Board (SB)	Digital	-	-	2 entradas DC/2 salidas DC
	Analógico	-	1 salida analógica	-
Módulo de comunicación (CM)				
<ul style="list-style-type: none"> • RS485 • RS232 				

1.2 Signal Boards

Una Signal Board (SB) permite agregar E/S a la CPU. Es posible agregar una SB con E/S digitales o analógicas. Una SB se conecta en el frente de la CPU.

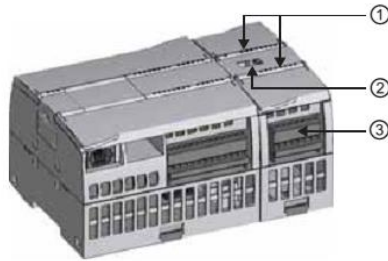
- SB con 4 E/S digitales (2 entradas DC y 2 salidas DC)
- SB con 1 entrada analógica



- ① LEDs de estado en la SB
- ② Conector extraíble para el cableado de usuario

1.3 Módulos de señales

Los módulos de señales se pueden utilizar para agregar funciones a la CPU. Los módulos de señales se conectan a la derecha de la CPU.

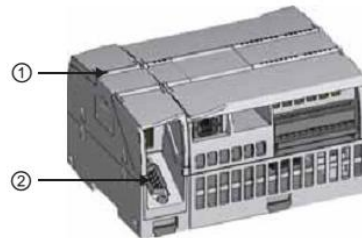


- ① LEDs de estado para las E/S del módulo de señales
- ② Conector de bus
- ③ Conector extraíble para el cableado de usuario

1.4 Módulos de comunicación

La gama S7-1200 provee módulos de comunicación (CMs) que ofrecen funciones adicionales para el sistema. Hay dos módulos de comunicación, a saber: RS232 y RS485.

- La CPU soporta como máximo 3 módulos de comunicación
- Todo CM se conecta en lado izquierdo de la CPU (o en lado izquierdo de otro CM)



- ① LEDs de estado del módulo de comunicación
- ② Conector de comunicación

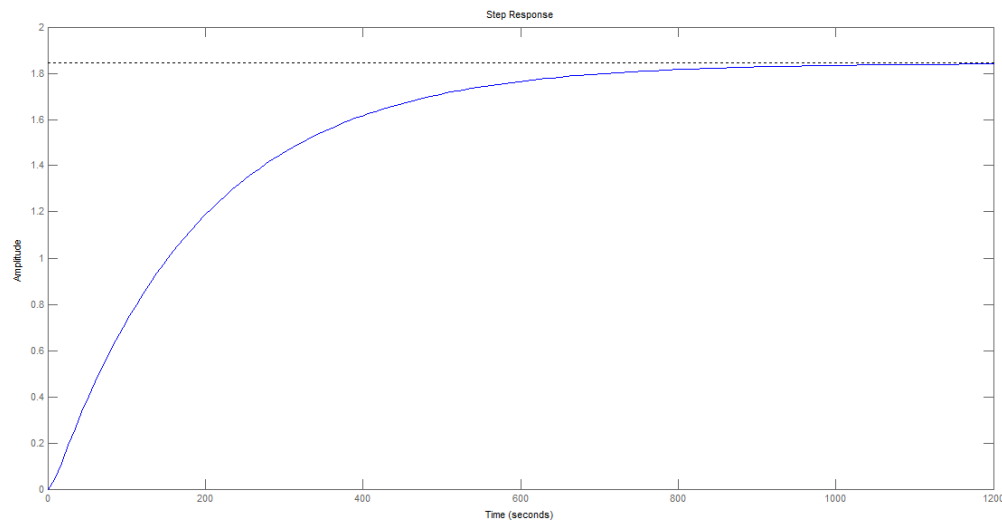
Anexo 4. Cálculo de parámetros del controlador con el modelo de segundo orden

Como opción al controlador sintonizado mostrado en el capítulo 3, se sintonizó nuevamente usando un promedio de los modelos encontrados en la primera aproximación de la identificación (tabla 7), y se realizó utilizando solamente los modelos que se generaban durante la extensión del cilindro que fueron los modelos que trataban de ser más congruentes. Promediando término a término se obtuvo el siguiente modelo:

$$G = \frac{-0.00060494s + 0.0018376}{s^2 + 0.19281429s + 0.00099668} \quad (A2)$$

Con este modelo se utilizó el método de Ziegler-Nichols para determinar los parámetros del controlador. Inicialmente se probó con el modelo en lazo abierto para observar la curva de comportamiento, lo cual dio como resultado:

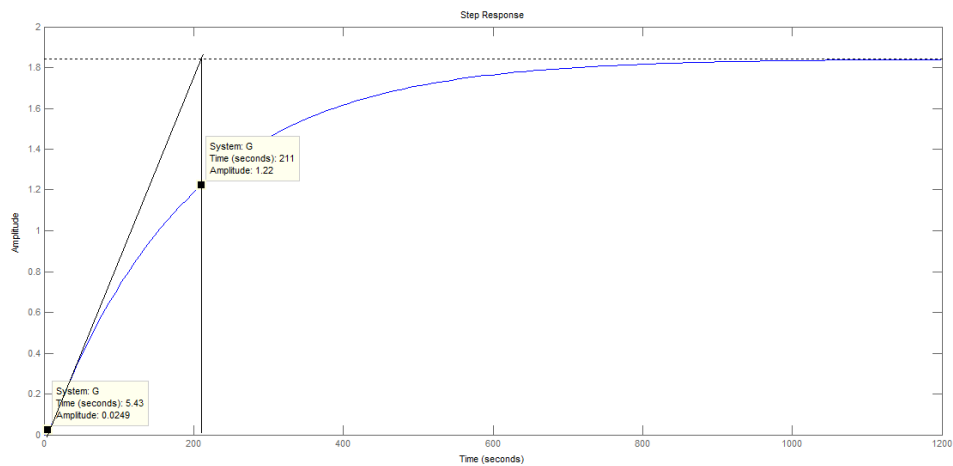
Figura A11. Resultado de la simulación



Como se observa en la figura se tiene una curva en “s” por lo cual se pudo utilizar el método en lazo abierto.

Para este caso se debían buscar los parámetros T y L gráficamente,

Figura A12. Obtención de parámetros T y L



Los parámetros son entonces:

$$T = 205.57 \text{ s}$$

$$L = 5.43 \text{ s}$$

Usando la tabla 8, los parámetros del controlador son:

$$K_p = 34.0732$$

$$T_i = 18.1 \text{ s}$$

Anexo 5. Códigos de Matlab utilizados

A continuación se presentan los códigos de Matlab que se utilizaron en el proyecto:

- Obtención del modelo del potenciómetro

```
clear
clc
%Datos experimentales:
v=xlsread('POTENCIOMETRO.xlsx','Hoja1','C3:C72');
x=xlsread('POTENCIOMETRO.xlsx','Hoja1','A3:A72');

%Cálculo de los parámetros de regresión lineal:
p=polyfit(x,v,1);
r2=corrcoef(x,v);
m=p(1);b=p(2);
fprintf('pendiente(m)=%5.3f\n',m);
fprintf('intercepto(b)=%5.3f\n',b);
fprintf('coef. de regresión=%5.3f\n\n',r2(2,1));

%Cálculo de los nuevos valores de v según la recta de ajuste:
%Vc=polyval(p,x);

%Gráfico de los datos experimentales y recta de ajuste:
plot(x,v,'*');
title('Datos experimentales');
xlabel('x [m]')
ylabel('Voltaje [V]')
legend('y=0,0257x-0,09')
```

- Identificación del sistema

```
clc
clear all
% Obtención de los datos de entrada del sistema
entrada=xlsread('datosimpares.xlsx','hoja1','B2:B401');
plot(entrada)
%Obtención de los datos de salida del sistema
salida=xlsread('datosimpares.xlsx','hoja1','A2:A401');
%Gráfica del sistema con entrada y salida
hold on
plot(salida)
%Llamado del Toolbox de identificación
ident
```

- Respuesta del sistema ante una entrada escalón y un controlador proporcional

```
clc; clear all;

%Definición de los polinomios del numerador y denominador de la planta
n=[0.000453 4.182e-5];
d=[1 0.05193 0.03423 0.0009569 0.0001304];

%Creación de la función de transferencia de la planta
G=tf(n,d);

%Reducción del diagrama de bloques del sistema
G1=series(0.1,G);
G2=feedback(G1,1);

%Obtención de la gráfica de respuesta al escalón unitario

step (G2)
```

- Respuesta del sistema ante una entrada escalón y el controlador sintonizado

```
clc; clear all;

%Definición de los polinomios del numerador y denominador de la planta
n=[0.000453 4.182e-5];
d=[1 0.05193 0.03423 0.0009569 0.0001304];

%Creación de la función de transferencia de la planta
G=tf(n,d);

%Definición de los polinomios del numerador y denominador del controlador
n1=[0.49401 1.57889e-2];
d1=[1 0];

%Creación de la función de transferencia del controlador
C=tf(n1,d1);

%Reducción del diagrama de bloques del sistema
G1=series(C,G);
G2=feedback(G1,1);

%Obtención de la gráfica de respuesta al escalón unitario

step (G2)
```